

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о документе

ФИО: Шебзухов Тимур Александрович

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского  
федерального университета

Дата подписания: 18.04.2024 16:02:29

Уникальный программный ключ:

d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕ-  
ЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

## Методические указания

по выполнению лабораторных работ  
по дисциплине «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ»  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника,

| №<br>п/п | Содержание                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Стр. |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|          | Введение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |
| 1.       | Цель и задачи изучения дисциплины                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |      |
| 2.       | Оборудование и материалы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |
| 3.       | Наименование лабораторных работ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |      |
| 4.       | Содержание лабораторных работ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |      |
| 4.1      | Лабораторная работа № 1. Режимы работы однофазного трансформатора. Опыт холостого хода трансформатора. Опыт короткого замыкания трансформатора                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |      |
| 4.2      | Лабораторная работа № 2. Режимы работы однофазного трансформатора. Определение коэффициента трансформации трансформатора                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |
| 4.3.     | Лабораторная работа № 3. Режимы работы однофазного трансформатора. Регистрация и отображение на компьютере тока включения однофазного трансформатора на холостом ходу                                                                                                                                                                                                                                                                            |      |
| 4.4      | Лабораторная работа № 4. Режимы работы однофазного трансформатора. Регистрация и отображение на компьютере тока короткого замыкания однофазного трансформатора                                                                                                                                                                                                                                                                                   |      |
| 4.5      | Лабораторная работа № 5. Трехфазные трансформаторы. Определение группы соединений обмоток трехфазного трансформатора.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |      |
| 4.6      | Лабораторная работа № 6. Параллельная работа и специальные типы трансформаторов. Определение уравнивающего тока, вызванного неравенством коэффициентов трансформации.                                                                                                                                                                                                                                                                            |      |
| 4.7      | Лабораторная работа № 7. Генераторы постоянного тока с параллельным и смешанным возбуждением. Возбуждение самовозбуждение генератора постоянного тока с регистрацией и отображением режимных параметров на компьютере. Регистрация и отображение на компьютере тока короткого замыкания генератора постоянного тока с параллельным возбуждением.                                                                                                 |      |
| 4.8      | Лабораторная работа № 8. Характеристика двигателей постоянного тока и их управление. Снятие характеристики холостого хода $E_0=f(I_f)$ генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Снятие характеристики короткого замыкания $I_K=f(I_f)$ генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Снятие внешней $U=f(I)$ , регулировочной $I_f=f(I)$ и нагрузочной $U=f(I_f)$ характеристик генератора постоянного тока с независи- |      |

мым/параллельным возбуждением.

- 4.9 Лабораторная работа № 9. Управление двигателями и КПД машин постоянного тока. Пуск в ход двигателя постоянного тока с независимым / параллельным / последовательным возбуждением с регистрацией и отображением режимных параметров на компьютере. Определение механической характеристики  $n=f(M)$  двигателя постоянного тока с независимым/параллельным / последовательным возбуждением. Определение рабочих характеристик  $n=f(P_2)$ ,  $M=f(P_2)$ ,  $\eta=f(P_2)$  двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.
- 4.10 Лабораторная работа №10. Пуск в ход трехфазных асинхронных двигателей. Пуск в ход трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым/фазным ротором и отображение режимных параметров на компьютере.
- 4.11 Лабораторная работа № 11. Пуск в ход трехфазных асинхронных двигателей. Снятие и определение характеристик холостого хода  $I_0=f(U)$ ,  $P_0=f(U)$  и  $\cos\phi_0=f(U)$  трехфазного АД с короткозамкнутым ротором. Снятие и определение характеристик короткого замыкания  $I_K=f(U)$ ,  $P_K=f(U)$ ,  $Z_K=f(U)$  трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
- 4.12 Лабораторная работа № 12. Регулирование частоты вращения и особые режимы работы асинхронных машин. Определение механической характеристики  $n=f(M)$  трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым / фазным ротором. Определение рабочих характеристик  $I=f(P_2)$ ,  $P_1=f(P_2)$ ,  $s=f(P_2)$ ,  $\eta=f(P_2)$ ,  $\cos\phi=f(P_2)$   $M=f(P_2)$  трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым / фазным ротором.
- 4.13 Лабораторная работа № 13. Характеристики синхронного генератора и параллельная работа синхронных машин. Снятие характеристики холостого хода  $E_0 = f(I_b)$  трехфазного синхронного генератора. Снятие характеристики короткого замыкания  $I_{к} = f(I_b)$  трехфазного синхронного генератора.
- 4.14 Лабораторная работа № 14. Характеристики синхронного генератора и параллельная работа синхронных машин. Снятие внешней  $U = f(I_1)$ , регулировочной  $I_b = f(I_1)$  и нагрузочной характеристик трехфазного синхронного генератора в автономном режиме.
- 4.15 Лабораторная работа № 15. Характеристики синхронного генератора и па-

раллельная работа синхронных машин. Подключение к сети трехфазного синхронного генератора методом точной синхронизации.

- 4.16 Лабораторная работа № 16. Параметры синхронных машин. Снятие угловых характеристик  $P = f(\theta)$ ,  $Q = f(\theta)$ ,  $U = f(\theta)$  трехфазного синхронного генератора. Снятие  $U$  – образной характеристики  $I = f(I_v)$  трехфазного синхронного генератора.
- 4.17 Лабораторная работа №17. Параметры синхронных машин. Регистрация и отображения на компьютере тока трехфазного короткого замыкания синхронного генератора.
- 4.18 Лабораторная работа №18. Синхронные двигатели и компенсаторы. Пуск в ход трехфазного синхронного двигателя с регистрацией и отображением режимных параметров на компьютере. Снятие угловых характеристик  $P=f(\delta)$ ,  $Q=f(\delta)$ ,  $U=f(\delta)$  синхронного двигателя. Снятие  $U$ –образной характеристики  $I=f(I_f)$  трехфазного синхронного двигателя.
- 5 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины
  - 5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины
  - 5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине
  - 5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

## ***Введение***

Лабораторные занятия создают оптимальные дидактические условия для деятельностного освоения студентами содержания и методологии изучаемой дисциплины «электрические машины», использование специального лабораторного оборудования и технических средств. Лабораторные занятия занимают преимущественное место при изучении общепрофессиональных и профессиональных дисциплин. Лабораторные занятия проводятся с целью выработки практических умений и приобретения навыков в решении экспериментных задач, отработки упражнений, выполнении чертежей, производстве расчётов и т.п.

Целью лабораторных занятий является формирование практических умений – профессиональных (выполнять определённые действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности) или учебных, необходимых в последующей учебной деятельности по общепрофессиональным и профессиональным дисциплинам.

Библиографический список содержит сведения о справочной литературе и дополнительных изданиях, необходимых для углубленного изучения отдельных вопросов.

## ***1. Цель и задачи изучения дисциплины***

Дисциплина «Электрические машины» изучается студентами, обучающимися по направлению подготовки бакалавриата «13.03.02 Электроэнергетика и электротехника». Целью изучения дисциплины является ознакомление студентов с основами теории и эксплуатационными характеристиками электрических машин и трансформаторов, а также теоретической базы и знаний в области электромеханического и статистического преобразования энергии, принципа действия основных видов электрических машин и трансформаторов и особенностей их применения.

Исходя из поставленных целей, задачами изучения дисциплины являются:

- получение практических навыков эксплуатации, и проектирования электрических машин в составе объектов электроэнергетики;
- знание материалов, применяемых при производстве генераторов и электрических двигателей;
- умение предотвращения аварии и выхода из строя электрической машины;
- умение принимать и обосновывать конкретные технические решения конструирования электроэнергетического оборудования.

## ***2. Оборудование и материалы***

Аппаратные средства:

Комплект типового лабораторного оборудования «Электротехнические машины».

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения. Переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

## ***3. Наименование лабораторных работ***

Для заочной формы обучения предусмотрены следующие лабораторные работы: Лабораторная работа № 1. Режимы работы однофазного трансформатора. Опыт холостого хода трансформатора. Опыт короткого замыкания трансформатора – 2 часа; Лабораторная работа № 7. Генераторы постоянного тока с параллельным и смешанным возбуждением. Возбуждение самовозбуждение генератора постоянного тока с регистрацией и отображением режимных параметров на компьютере. Регистрация и отображение на компьютере тока короткого замыкания генератора постоянного тока с параллельным возбуждением – 2 часа; Лабораторная работа №10. Пуск в ход трехфазных асинхронных двигателей. Пуск в ход трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым/фазным ротором и отображение режимных параметров на компьютере – 2 часа, практическая подготовка – 2 часа; Лабораторная работа

№17. Параметры синхронных машин. Регистрация и отображения на компьютере тока трехфазного короткого замыкания синхронного генератора – 2 часа.

| № Темы дисциплины | Наименование тем дисциплины, их краткое содержание                                                                                                                                                                                                              | Объем часов | Из них практическая подготовка, часов |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------|
| 4 семестр         |                                                                                                                                                                                                                                                                 |             |                                       |
| 1                 | <b>Лабораторная работа № 1. Режимы работы однофазного трансформатора.</b> Опыт холостого хода трансформатора. Опыт короткого замыкания трансформатора<br>Освоить методику проведения опыта холостого хода, опыта короткого замыкания.                           | 2           | —                                     |
| 2                 | <b>Лабораторная работа № 2. Режимы работы однофазного трансформатора.</b> Определение коэффициента трансформации трансформатора<br>Изучить способы определения коэффициента трансформации                                                                       | 2           | —                                     |
| 3                 | <b>Лабораторная работа № 3. Режимы работы однофазного трансформатора.</b> Регистрация и отображение на компьютере тока включения однофазного трансформатора на холостом ходу<br>Изучить особенности токов включения однофазного трансформатора на холостом ходу | 2           | —                                     |
| 4                 | <b>Лабораторная работа № 4. Режимы работы однофазного трансформатора.</b> Регистрация и отображение на компьютере тока короткого замыкания однофазного трансформатора<br>Изучить кривые токов короткого замыкания однофазного трансформатора                    | 2           | —                                     |
| 5                 | <b>Лабораторная работа № 5. Трехфазные трансформаторы.</b> Определение группы соединений обмоток трехфазного трансформатора.<br>Изучить работу трансформаторов с различными группами соединения                                                                 | 2           | —                                     |
| 6                 | <b>Лабораторная работа № 6. Параллельная работа и специальные типы трансформаторов.</b> Определение уравнивающего тока, вызванного неравенством коэффициентов трансформации.<br>Изучить условия появления уравнивающего тока                                    | 2           | —                                     |
| 7                 | <b>Лабораторная работа № 7. Генераторы постоянного тока с параллельным и смешанным возбуждением.</b> Возбуждение самовозбуждение генератора песто-                                                                                                              | 2           | —                                     |

|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |   |   |
|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|
|   | <p>янного тока с регистрацией и отображением режимных параметров на компьютере. Регистрация и отображение на компьютере тока короткого замыкания генератора постоянного тока с параллельным возбуждением.</p> <p>Провести эксперимент возбуждения самовозбуждения генератора постоянного тока с регистрацией и отображением режимных параметров на компьютере. Регистрация и отображение на компьютере тока короткого замыкания генератора постоянного тока с параллельным возбуждением</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |   |   |
| 8 | <p><b>Лабораторная работа № 8. Характеристики двигателей постоянного тока и их управление.</b> Снятие характеристики холостого хода <math>E_0=f(I_f)</math> генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Снятие характеристики короткого замыкания <math>I_K=f(I_f)</math> генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Снятие внешней <math>U=f(I)</math>, регулировочной <math>I_f=f(I)</math> и нагрузочной <math>U=f(I_f)</math> характеристик генератора постоянного тока с независимым/параллельным возбуждением.</p> <p>Определить характеристики холостого хода <math>E_0=f(I_f)</math> генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Определить характеристики короткого замыкания <math>I_K=f(I_f)</math> генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Определить внешней <math>U=f(I)</math>, регулировочной <math>I_f=f(I)</math> и нагрузочной <math>U=f(I_f)</math> характеристик генератора постоянного тока с независимым / параллельным возбуждением</p> | 2 | — |
| 9 | <p><b>Лабораторная работа № 9. Управление двигателями и КПД машин постоянного тока.</b> Пуск в ход двигателя постоянного тока с независимым / параллельным / последовательным возбуждением с регистрацией и отображением режимных параметров на компьютере. Определение механической характеристики <math>n=f(M)</math> двигателя постоянного тока с независимым/параллельным / последовательным возбуждением. Определение рабочих характеристик <math>n=f(P_2)</math>, <math>M=f(P_2)</math>, <math>\eta=f(P_2)</math> двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.</p> <p>Определить механические характеристики <math>n=f(M)</math> двигателя постоянного тока с не-</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2 | — |



|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |           |   |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---|
|                        | зависимым/параллельным / последовательным возбуждением. Определить рабочие характеристики $n=f(P_2)$ , $M=f(P_2)$ , $\eta=f(P_2)$ двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |           |   |
| <b>Итого 4 семестр</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <b>18</b> | — |
| <b>5 семестр</b>       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |           |   |
| 19                     | <b>Лабораторная работа №10. Пуск в ход трехфазных асинхронных двигателей.</b><br>Пуск в ход трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым/фазным ротором и отображение режимных параметров на компьютере.<br>Изучить режимы пуска в ход АД                                                                                                                                                                                                                                                           | 2         | 2 |
| 20                     | <b>Лабораторная работа № 11. Пуск в ход трехфазных асинхронных двигателей.</b><br>Снятие и определение характеристик холостого хода $I_0=f(U)$ , $P_0=f(U)$ и $\cos\varphi_0=f(U)$ трехфазного АД с короткозамкнутым ротором. Снятие и определение характеристик короткого замыкания $I_K=f(U)$ , $P_K=f(U)$ , $Z_K=f(U)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.<br>Снять и определить характеристики холостого хода.                                                                | 2         | — |
| 21                     | <b>Лабораторная работа № 12. Регулирование частоты вращения и особые режимы работы асинхронных машин.</b><br>Определение механической характеристики $n=f(M)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым / фазным ротором. Определение рабочих характеристик $I=f(P_2)$ , $P_1=f(P_2)$ , $s=f(P_2)$ , $\eta=f(P_2)$ , $\cos\varphi=f(P_2)$ $M=f(P_2)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым / фазным ротором.<br>Провести эксперимент и построить механическую характеристику АД. | 2         | — |
| 22                     | <b>Лабораторная работа № 13. Характеристики синхронного генератора и параллельная работа синхронных машин.</b><br>Снятие характеристики холостого хода $E_0 = f(I_b)$ трехфазного синхронного генератора. Снятие характеристики короткого замыкания $I_{1k} = f(I_b)$ трехфазного синхронного генератора.<br>Определить характеристики холостого хода $E_0 = f(I_b)$ трехфазного синхронного генератора. Определить характеристики короткого замыкания $I_{1k} = f(I_b)$ трехфазного синхронного генератора  | 2         | — |

|                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |           |          |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------|
| 23                         | <p><b>Лабораторная работа № 14. Характеристики синхронного генератора и параллельная работа синхронных машин.</b> Снятие внешней <math>U = f(I_1)</math>, регулировочной <math>I_b = f(I_1)</math> и нагрузочной характеристик трехфазного синхронного генератора в автономном режиме.</p> <p>Определить внешние <math>U = f(I_1)</math>, регулировочные <math>I_b = f(I_1)</math> и нагрузочные характеристики трехфазного синхронного генератора в автономном режиме.</p>                                                                                                                                                                                                               | 2         | —        |
| 24                         | <p><b>Лабораторная работа № 15. Характеристики синхронного генератора и параллельная работа синхронных машин.</b> Подключение к сети трехфазного синхронного генератора методом точной синхронизации.</p> <p>Подключить к сети трехфазный синхронный генератор методом точной синхронизации.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 2         | 2        |
| 25                         | <p><b>Лабораторная работа № 16. Параметры синхронных машин.</b> Снятие угловых характеристик <math>P = f(\theta)</math>, <math>Q = f(\theta)</math>, <math>U = f(\theta)</math> трехфазного синхронного генератора. Снятие <math>U</math> – образной характеристики <math>I = f(I_b)</math> трехфазного синхронного генератора. Определить угловые характеристики <math>P = f(\theta)</math>, <math>Q = f(\theta)</math>, <math>U = f(\theta)</math> трехфазного синхронного генератора.</p>                                                                                                                                                                                              | 2         | —        |
| 26                         | <p><b>Лабораторная работа №17. Параметры синхронных машин.</b> Регистрация и отображения на компьютере тока трехфазного короткого замыкания синхронного генератора.</p> <p>Рассмотреть регистрацию и отображение на компьютере тока трехфазного короткого замыкания синхронного генератора</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 2         | —        |
| 27                         | <p><b>Лабораторная работа №18. Синхронные двигатели и компенсаторы.</b> Пуск в ход трехфазного синхронного двигателя с регистрацией и отображением режимных параметров на компьютере. Снятие угловых характеристик <math>P=f(\delta)</math>, <math>Q=f(\delta)</math>, <math>U=f(\delta)</math> синхронного двигателя. Снятие <math>U</math>–образной характеристики <math>I=f(I_f)</math> трехфазного синхронного двигателя.</p> <p>Определить угловые характеристики <math>P=f(\delta)</math>, <math>Q=f(\delta)</math>, <math>U=f(\delta)</math> синхронного двигателя. Определить <math>U</math>–образные характеристики <math>I=f(I_f)</math> трехфазного синхронного двигателя.</p> | 2         | —        |
| <b>Итого за 5 семестр:</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <b>18</b> | <b>4</b> |

|              |           |          |
|--------------|-----------|----------|
| <b>Итого</b> | <b>36</b> | <b>4</b> |
|--------------|-----------|----------|

#### **4. Содержание лабораторных работ**

##### **Лабораторная работа № 1. Режимы работы однофазного трансформатора.**

##### **Опыт холостого хода трансформатора. Опыт короткого замыкания трансформатора**

**Цель работы:** Освоить методику проведения опыта холостого хода, опыта короткого замыкания.

##### **Основы теории:**

**Трансформатор** - это статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения при неизменной частоте.

Так как электрическая энергия на пути от источника до потребителя несколько раз трансформируется, то установленная мощность всех трансформаторов в несколько раз превышает суммарную мощность всех источников электроэнергии.

По назначению трансформаторы подразделяются на силовые, сварочные и измерительные, по конструкции - на стержневые и броневые.

По числу фаз трансформаторы подразделяются на однофазные и трехфазные, а по способу охлаждения - на сухие и масляные.

Простейший однофазный трансформатор состоит из двух основных частей: магнитопровода (сердечника) и обмоток. Сердечник набирается из листов электротехнической стали толщиной 0,5мм, с обеих сторон покрытых электротехническим лаком для уменьшения потерь в стали на вихревые токи. Кроме того, электротехническая сталь имеет повышенное удельное сопротивление и малые потери на гистерезис. Сердечник служит для усиления электромагнитной связи между обмотками.

На сердечнике располагаются обмотки. Обмотка, подключаемая к питающей сети, называется *первичной*, а обмотка, к которой подключаются потребители переменного тока, называется *вторичной* обмоткой (рис. 1.1).

Если к первичной обмотке, имеющей число витков  $w_1$  подвести переменное напряжение  $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$ , то по ней начнет протекать ток  $i_1$ , который будет отставать от  $u_1$  на  $90^\circ$ , этот ток создаст в сердечнике переменный магнитный поток, также изменяющийся по синусоидальному закону  $\Phi_0 = \Phi_{0m} \cdot \cos \omega t$ .

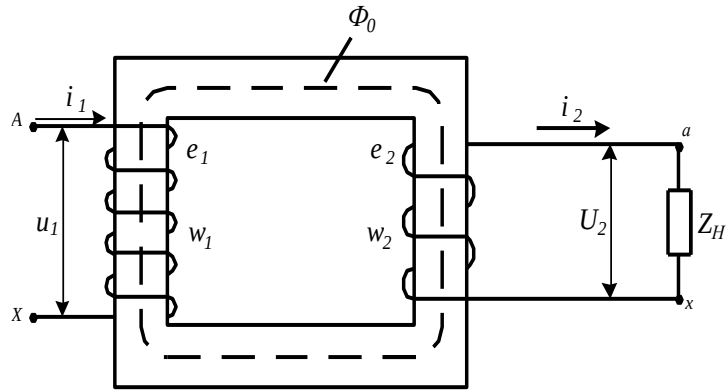


Рисунок 1.1 - Схема трансформатора

Магнитный поток, замыкаясь по сердечнику, будет наводить в первичной и вторичной обмотках э.д.с., пропорциональные числам витков:

$$e_1 = w_1 \frac{d\phi_0}{dt} = w_1 \cdot \omega \cdot \Phi_{0M} \sin \omega t = E_{1M} \cdot \sin \omega t$$

$$e_2 = w_2 \frac{d\phi_0}{dt} = w_2 \cdot \omega \cdot \Phi_{0M} \sin \omega t = E_{2M} \cdot \sin \omega t .$$

Действующие значения этих э.д.с. будут равны:

$$E_1 = 4,44 \cdot w_1 \cdot f \cdot \Phi_{0M}; \quad E_2 = 4,44 \cdot w_2 \cdot f \cdot \Phi_{0M}$$

Отношение этих э.д.с. называется коэффициентом трансформации:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2} .$$

Если  $U_2 > U_1$ , то трансформатор повышающий, а если  $U_2 < U_1$  – то понижающий. В паспорте трансформатора указывается обычно не коэффициент трансформации, а отношение высшего напряжения к низшему.

При построении векторных диаграмм напряжений и токов трансформатора могут возникнуть затруднения с выбором масштаба напряжений первичной и вторичной обмоток,

т.к.  $U_1 = kU_2$ , а диаграммы должны быть в одном масштабе. Поэтому вместо реального трансформатора обычно рассматривают так называемый *приведенный* трансформатор, у которого одна обмотка (обычно вторичная) приведена к другой, т.е. её параметры пересчитаны таким образом, чтобы это не отразилось на энергетических процессах в трансформаторе.

Приведенное напряжение и другие параметры вторичной обмотки обозначаются  $U_2'$ ,

$$I_2', r_2', x_2', z_2' .$$

Если  $U_2' = \kappa U_2 = U_1$  и  $w_2' = \kappa w_2 = w_1$ , то ток  $I_2'$  определится из условия постоянства потокосцеплений  $I_2 w_2 = I_2' w_2'$ , откуда

$$I_2' = \frac{I_2 w_2}{w_2'} = \frac{I_2 w_2}{w_1} = \frac{I_2}{\kappa}.$$

Аналогично, приведенное сопротивление  $r_2' = \kappa^2 r_2$  определяется из равенства потерь мощности во вторичной обмотке до приведения и после приведения:

$$I_2^2 r_2 = (I_2')^2 r_2',$$

$$\text{откуда } r_2' = \left( \frac{I_2}{I_2'} \right)^2 \cdot r_2 = \left( \frac{I_2 \cdot \kappa}{I_2} \right)^2 \cdot r_2 = \kappa^2 r_2.$$

Аналогично,  $x_2' = \kappa^2 x_2$  и  $z_2' = \kappa^2 z_2$ .

Сумма  $r_1 + r_2' = r_\kappa$  называется активным сопротивлением короткого замыкания, а  $x_1 + x_2' = x_\kappa$  - индуктивным сопротивлением короткого замыкания и  $z_1 + z_2' = z_\kappa$  - полным сопротивлением короткого замыкания.

Режим работы, при котором вторичная обмотка разомкнута, т.е. нагрузка трансформатора отсутствует, называется режимом *холостого хода*. При этом магнитный поток создается намагничивающей силой первичной обмотки:

$$F_o = I_o w_1,$$

где  $I_o$  – ток холостого хода.

Величина намагничивающей силы  $F_o$  является постоянной и зависит от размеров и материала сердечника.

Режим работы, при котором во вторичную обмотку включена нагрузка, называется *рабочим режимом* или *режимом нагрузки*. При работе в режиме нагрузки каждая из обмоток трансформатора создает свою намагничивающую силу, причем намагничивающая сила вторичной обмотки будет направлена навстречу намагничивающей силе первичной обмотки:

$$\dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 \quad \text{или} \quad \dot{I}_0 \cdot w_0 = \dot{I}_1 \cdot w_1 + \dot{I}_2 \cdot w_2.$$

Таким образом, магнитный поток, создаваемый вторичной обмоткой, размагничивает магнитный поток, созданный первичной обмоткой. Так как магнитный поток трансформатора по величине постоянен, то намагничивающая сила первичной обмотки увеличивается только на такую величину, чтобы геометрическая сумма  $\dot{I}_1 w_1$  и  $\dot{I}_2 w_2$  оставалась практически постоянной. Следовательно, при увеличении тока во вторичной обмотке ток первичной

обмотки увеличивается настолько, чтобы намагничивающая сила  $\dot{I}_0 w_0$  поддерживалась постоянной. При увеличении нагрузки трансформатора напряжение вторичной обмотки снижается на величину  $\Delta U$ , которое у малых трансформаторов может быть определено путем испытаний под нагрузкой трансформатора и непосредственным измерением  $\Delta U$ . Трансформатор большой мощности нагрузить и испытать под нагрузкой очень сложно и неэкономично, поэтому для них  $\Delta U$  определяют расчетным путем. Нагрузка трансформатора может быть чисто *активной* (освещение), при которой  $\cos \varphi_2 = 1, 0$ , и смешанной – *активно-индуктивной* (**R-L**) или *активно-емкостной* (**R-C**), при которых  $\cos \varphi_2 < 1,0$ . Зависимость напряжения вторичной обмотки от тока нагрузки, т.е.  $U_2 = f(I_2)$ , при постоянном по величине напряжении первичной обмотки  $U_1$  и постоянном значении коэффициента мощности  $\cos \varphi_2$ , называется *внешней характеристикой трансформатора* (рис. 1.2).

Напряжение на вторичной обмотке при холостом ходе, т.е. при  $I_2 = 0$ , называется *номинальным* напряжением. При нагрузке напряжение будет изменяться на величину  $\Delta U$ :

$$\Delta U = \frac{U_{2H} - U_2}{U_{2H}}.$$

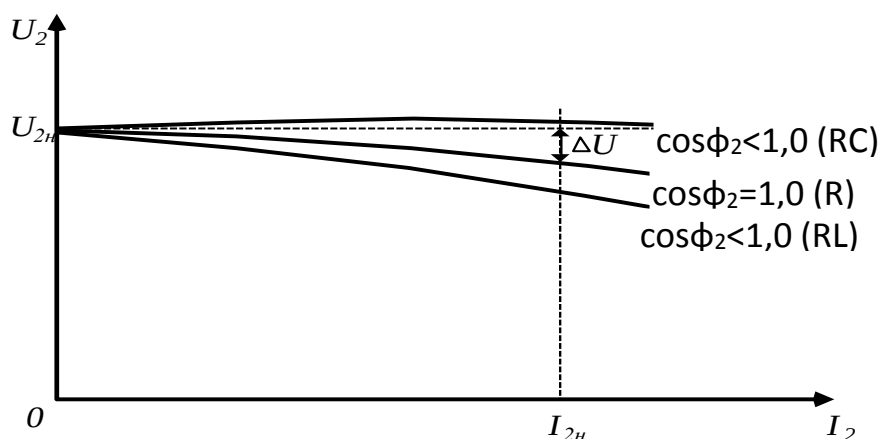


Рисунок 1.2 – Внешняя характеристика трансформатора

Для определения величины  $\Delta U$  расчетным путем необходимо выполнить два опыта: опыт холостого хода и опыт короткого замыкания.

Опыт *холостого хода* выполняется для определения номинального напряжения вторичной обмотки  $U_{2H}$ , тока холостого хода  $I_0$  и потерь мощности холостого хода  $P_0$ . Так как при холостом ходе ток  $I_2 = 0$ , а ток  $I_1 = I_0$  и составляет несколько процентов от тока  $I_{1H}$ , то потери в обмотке при холостом ходе малы и можно считать, что потери холостого хода – это потери в стали сердечника.

Опыт *короткого замыкания*, при котором вторичная обмотка замкнута накоротко ( $z_H = 0$ ), выполняется при пониженном напряжении  $U_{1KH}$ . При этом напряжение повышается от нуля до значения  $U_{1KH}$ , при котором ток замкнутой накоротко вторичной обмотки равен номинальному току  $I_{2H}$ . Так как это напряжение составляет несколько процентов от номинального, то и магнитный поток, пропорциональный напряжению, очень мал и потерями в стали можно пренебречь и считать, что потери при опыте короткого замыкания – это потери в меди обмоток трансформатора.

Зная  $U_{1KH}$  и потери  $P_{KH}$  можно определить  $z_K$ ,  $r_K$ ,  $x_K$ :

$$z_K = \frac{U_{1KH}}{I_{1H}}; \quad r_K = \frac{P_{KH}}{I_{1H}^2}; \quad x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2},$$

где  $r_K = r_1 + r_2'$  и  $x_K = x_1 + x_2'$  – активное и реактивное сопротивления короткого замыкания.

Изменение напряжения под нагрузкой  $\Delta U$  можно определить по формуле:

$$\Delta U = \beta \cdot (U_{ka} \cdot \cos \varphi_2 + U_{кр} \cdot \sin \varphi_2),$$

где  $U_{ka} = I_{1H} \cdot r_K$  – активная составляющая напряжения короткого замыкания;

$U_{кр} = I_{1H} \cdot x_K$  – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания;

$\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$  – коэффициент нагрузки трансформатора;

значениями  $\cos \varphi_2$  и  $\sin \varphi_2$  задается.

- Зная  $U_{2H}$  и  $\Delta U$  при различных значениях  $\beta$  и заданном характере нагрузки, можно определить значение  $U_2$  при нагрузке и построить внешние характеристики трансформатора расчетным путем.

Важной характеристикой трансформатора является его КПД:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P}.$$

КПД можно определить путем непосредственного измерения мощностей  $P_2$  и  $P_1$  или расчетным путем, зная одну из его мощностей и сумму потерь в нем. Первый метод применяют при испытании маломощных трансформаторов, т.к. в этом случае нет проблем с нагрузкой трансформатора реостатами. В мощных трансформаторах КПД определяют путем измерения или расчета потерь в нем и полезной нагрузочной мощности  $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ . Величина КПД зависит от нагрузки (рис 1.3).



КПД имеет максимум при относительной нагрузке  $\frac{P_2}{P_{2H}} \approx 0,7$ , когда постоянные потери ( $P_0$ ) равны переменным потерям ( $P_K$ ).

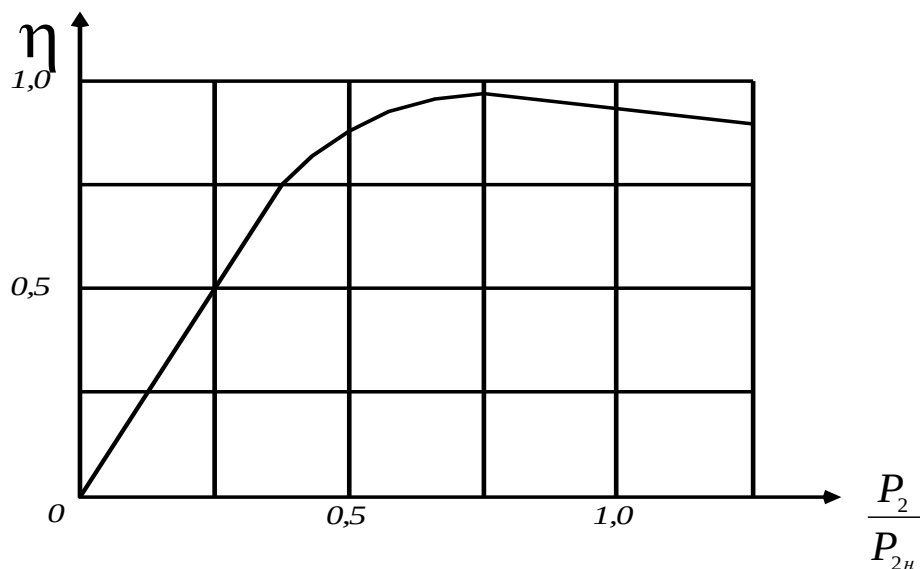


Рисунок 1.3 – Зависимость КПД трансформатора от нагрузки

Сопротивления схемы замещения трансформатора принято определять экспериментально из опытов холостого хода и короткого замыкания.

Опыт холостого хода.

Схема опыта приведена на рис.1.4,а. Условия проведения опыта:

- вторичная обмотка  $w_2$  разомкнута;
- на первичную обмотку  $w_1$  подается номинальное напряжение  $U_{ном}$ .

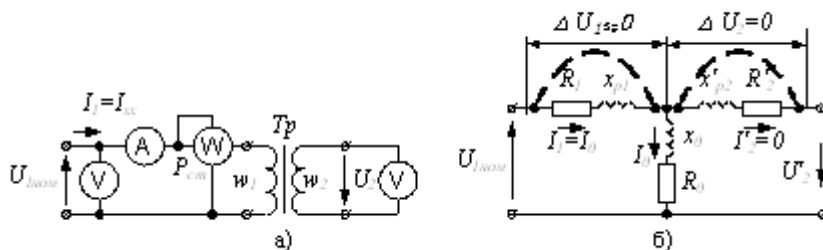


Рисунок 1.4 – Принципиальная электрическая схема(а) опыта холостого хода и схема замещения (б) трансформатора для опыта

Подключенными приборами измеряются: напряжения  $U_1$  и  $U_2$  первичной и вторичной обмоток, ток холостого хода  $I_1=I_{xx}$  первичной обмотки и потребляемая активная мощность  $P_1$ . Так как ток во вторичной обмотке нулевой, а ток первичной обмотки  $I_{xx}$  мал, то потерями мощности в активных сопротивлениях обмоток можно пренебречь. Магнитный поток

в сердечнике номинальный, так как к трансформатору приложено номинальное напряжение  $U_{1ном}$ . Измеренная активная мощность  $P_1$  является номинальной мощностью потерь в стали  $P_1 = P_{ст.ном}$ .

Схема замещения для опыта представлена на рис.1.4,б.

Так как в разомкнутой вторичной обмотке ток нулевой, то нулевым будет падение напряжения  $\square U_2 = 0$  на внутреннем сопротивлении обмотки. Вследствие этого внутреннее сопротивление вторичной обмотки можно считать нулевым. У реальных трансформаторов внутренние сопротивления  $x_{p1}$  и  $R_1$  первичной обмотки намного меньше сопротивлений  $x_0$  и  $R_0$  цепи намагничивания:  $R_1 \ll R_0$  и  $x_{p1} \ll x_0$ . Поэтому внутренними сопротивлениями первичной обмотки можно пренебречь и считать их нулевыми. На схеме замещения внутренние сопротивления обоих обмоток показаны закороченными.

По измеренным значениям рассчитывают:

1) сопротивления  $R_0$  и  $x_0$  цепи намагничивания по формулам

$$R_0 = \frac{P_1}{I_1^2}, \quad z_0 = \frac{U_1}{I_1}, \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - R_0^2}$$

2) коэффициент трансформации

$$k_{тр} = \frac{U_1}{U_2}$$

#### Опыт короткого замыкания.

Схема опыта приведена на рис.1.5,а. Условия проведения опыта:

- вторичная обмотка  $w_2$  замкнута на амперметр с практически нулевым внутренним сопротивлением;
- на первичную обмотку  $w_1$  подается пониженное напряжение  $U_{кз}$  такой величины, при котором во вторичной обмотке протекает номинальный ток  $I_{2ном}$ .

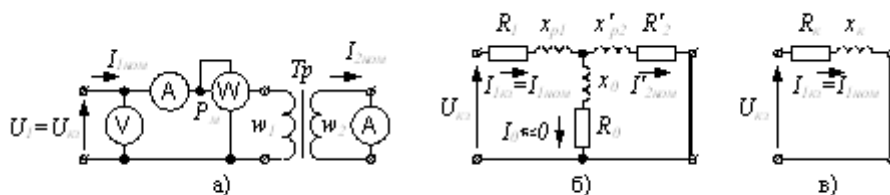


Рисунок 1.5 – Принципиальная электрическая схема (а) опыта короткого замыкания и схемы замещения (б,в) трансформатора для опыта

Подключенными приборами измеряются: напряжение  $U_1$  первичной обмотки, токи  $I_1$  и  $I_2$  первичной и вторичной обмоток и потребляемая активная мощность  $P_1$ . Напряжение короткого замыкания  $U_{кз}$  мало и составляет всего 4...7% от номинального. Магнитный поток в магнитопроводе, который пропорционален  $U_{кз}$ , также очень мал и потери мощности в стали

$P_{ст}$ , которые пропорциональны  $\Phi_{осн}^{1,6}$  и составляют  $(0,04...0,07)^{1,6} = 0,006...0,01 = 0,6...1\%$ , что является очень малой величиной. Поэтому потерями мощности в стали можно пренебречь.

При проведении опыта контролируется на равенство номинальному току  $I_2$  вторичной обмотки. В силу свойства трансформатора трансформировать ток, номинальным будет также ток и первичной обмотки  $I_{ном}$ . Значит измеренные потери мощности являются номинальными потерями в меди  $P_{м.ном}$  обмоток.

В полной схеме замещения для опыта, представленной на рис.1.5,в, цепью намагничивания можно пренебречь, так как ток  $I_0$  в ней намного меньше токов  $I_1$  и  $I'_2$ . Объединив, затем, активные  $R_1$ ,  $R'_2$  и реактивные сопротивления рассеяния  $x_{p1}$ ,  $x'_{p2}$  обмоток в сопротивления, соответственно,  $R_k$  и  $x_k$ , получим простейшую схему замещения (рис.1.5,в) для опыта короткого замыкания.

По измеренным значениям рассчитывают:

1) сопротивления  $R_k$  и  $x_k$  короткого замыкания по формулам

$$R_k = \frac{P_1}{I_1^2}, \quad z_k = \frac{U_1}{I_1}, \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - R_k^2}$$

2) активные  $R_1$ ,  $R'_2$  и реактивные сопротивления рассеяния  $x_{p1}$ ,  $x'_{p2}$  обмоток, принимаемые равными половине сопротивлений  $R_k$  и  $x_k$  короткого замыкания:

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2}, \quad x_{p1} = x'_{p2} = \frac{x_k}{2}$$

и физические сопротивления вторичной обмотки:

$$R_2 = \frac{R'_2}{k_{тр}^2}, \quad x_{p2} = \frac{x'_{p2}}{k_{тр}^2}$$

### **Указание по технике безопасности:**

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

### **Описание электрической схемы соединений:**

Автотрансформатор А1 используется в качестве регулируемого источника синусоидального напряжения промышленной частоты. Один из однофазных трансформаторов трехфазной трансформаторной группы А2 является испытуемым. С помощью мультиметров блока Р1 контролируется ток и напряжение первичной обмотки испытуемого трансформатора. С помощью измерителя Р2 контролируется активная и реактивная мощности, потребляемые испытуемым трансформатором.

Опыт холостого хода выполняется по схеме (рис. 1.6.):

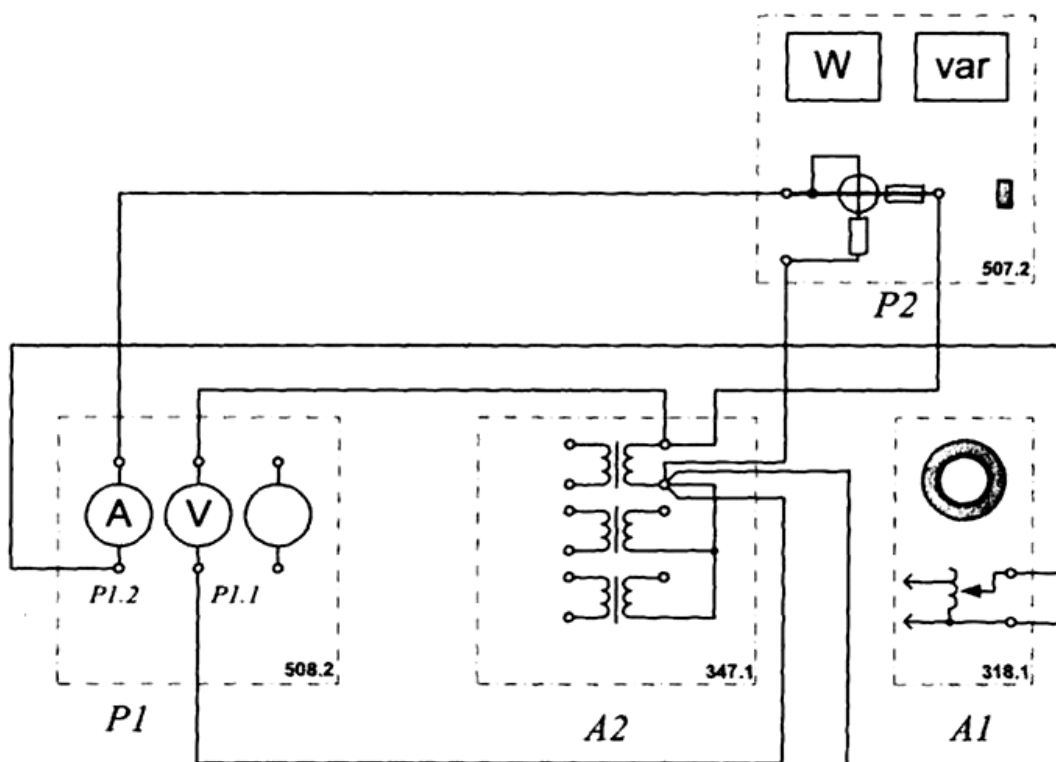


Рисунок 1.6 – Электрическая схема соединений

**Указания по проведению эксперимента:**

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" автотрансформатора A1.
- Соедините электрическим шнуром приборную вилку электропитания «220В» автотрансформатора A1 с розеткой однофазной трехпроводной электрической сети питания напряжением 220 В.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений. Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора A1 в крайнее против часовой стрелки положение.
- Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
- Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора A1, изменяйте напряжение  $U$  на выводах первичной обмотки испытуемого однофазного трансформатора в диапазоне 0...240 В и заносите показания вольтметра P1.1 (напряжение  $U$ ) и амперметра P1.2 (ток  $I_0$  первичной обмотки трансформатора), а также ваттметра и варметра изме-

рителя Р2 (активная  $P_0$  и реактивная  $Q_0$  мощности, потребляемые трансформатором) в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

|                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| U, В                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| I <sub>0</sub> , мА |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| P <sub>0</sub> , Вт |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Q <sub>0</sub> , Вт |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Используя данные таблицы 1.1., вычислите соответствующие напряжению U значения коэффициента мощности по формуле:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}};$$

Занесите полученные результаты в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

|                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| U, В               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| cos φ <sub>0</sub> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Используя данные таблиц 1.1. и 1.2 постройте искомые характеристики холостого хода  $I_0=f(U)$ ,  $P_0=f(U)$ ,  $\cos \varphi_0=f(U)$  однофазного трансформатора.

#### **Описание электрической схемы соединений:**

Автотрансформатор А1 используется в качестве регулируемого источника синусоидального напряжения промышленной частоты. Один из однофазных трансформаторов трехфазной трансформаторной группы А2 является испытуемым. Реостат А13 ограничивает темп роста тока в обмотках испытуемого трансформатора. С помощью мультиметров блока Р1 контролируется напряжение первичной и вторичной обмоток испытуемого трансформатора. С помощью измерителя Р2 контролируются активная и реактивная мощности, потребляемые испытуемым трансформатором.

Опыт короткого замыкания выполняется по схеме (рис 1.7)

#### **Указания по проведению эксперимента:**

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от се-



ти электропитания.

- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ " автотрансформатора А1.
- Соедините электрическим шнуром приборную вилку электропитания «220 В» автотрансформатора А1 с розеткой однофазной **трехпроводной** электрической сети питания напряжением 220 В.

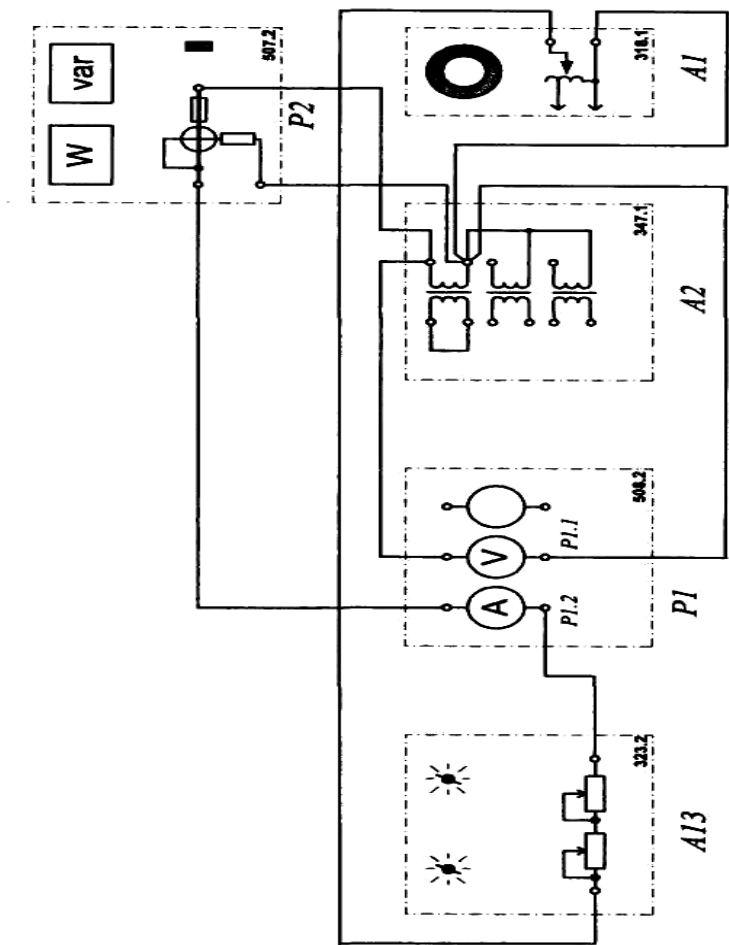


Рисунок 1.7 – Электрическая схема соединений.

блока Р1, задействованные в эксперименте.

- Медленно вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 по часовой стрелке, увеличивайте ток  $I_k$  первичной обмотки испытуемого однофазного трансформатора до тех пор пока показания амперметра Р 1.2 не достигнут **0,5 А (не более!)** и заносите показания амперметра Р1.2 (ток  $I$ ), вольтметра Р1.1 (напряжение  $U$ ), а также ваттметра и варметра измерителя Р2 (активная  $P_k$  и реактивная  $Q_k$  **МОЩНОСТИ** , потребляемые трансформатором) в таблицу 1.3.

Таблица 1.3

|          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $I_k, A$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U, B$   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

- Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 в крайнее против часовой стрелки положение.

В трехфазной трансформаторной группе А2 переключателем установите желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора, например, 127 В.

- Установите суммарное сопротивление реостата А13 равным, например, 100 Ом.

- Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

- Активизируйте мультиметры

|                              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b>P<sub>к</sub>,<br/>Вт</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>Q<sub>к</sub>,<br/>Вт</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Используя данные таблицы 10.1, вычислите соответствующие напряжению U значения коэффициента мощности по формуле

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{P_k^2 + Q_k^2}};$$

Занесите полученные результаты в таблицу 1.4.

Таблица 1.4

|                          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b>U, В</b>              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>cos φ<sub>к</sub></b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- Используя данные таблиц 1.3 и 1.4 постройте искомые характеристики короткого замыкания  $I_k=f(U)$ ,  $P_k=f(U)$ ,  $\cos\varphi_k=f(U)$  однофазного трансформатора.

### Контрольные вопросы

1. Что такое трансформатор?
2. Из чего состоит трансформатор?
3. Виды трансформаторов?
4. С какой целью выполняют опыт холостого хода?
5. Чем обусловлены потери мощности в режиме холостого хода?
6. Назовите условия проведения опыта холостого хода и определяемые по результатам опыта параметры схемы замещения трансформатора.
7. Поясните вид схемы замещения трансформатора и смысл измеренных сигналов в опыте холостого хода.
8. Назовите условия проведения опыта короткого замыкания и определяемые по результатам опыта параметры схемы замещения трансформатора.
9. Поясните вид схемы замещения трансформатора и смысл измеренных сигналов в опыте короткого замыкания.





## Лабораторная работа № 2. Режимы работы однофазного трансформатора. Определение коэффициента трансформации трансформатора

**Цель работы:** изучить способы определения коэффициента трансформации

### Основы теории:

Однофазный трансформатор содержит катушки с намотанными на них обмотками, которые посажены на замкнутый сердечник (магнитопровод) из электротехнической стали. Катушки называются первичной и вторичной обмотками, которые имеют, соответственно,  $w_1$  и  $w_2$  число витков (рис.2.1). Первичная обмотка одна-единственная, а вторичных обмоток может быть больше одной. Первичная обмотка подключается к источнику переменного напряжения (в сеть)  $U_1$ . С вторичной обмотки снимается переменное напряжение  $U_2$ . Трансформатор может работать как в режиме холостого хода (х.х.), когда вторичная обмотка разомкнута (рис.2.1,а), так и под нагрузкой, когда к вторичной обмотке подключено сопротивление нагрузки (нагрузка)  $z_H$  (рис.2.1,б).

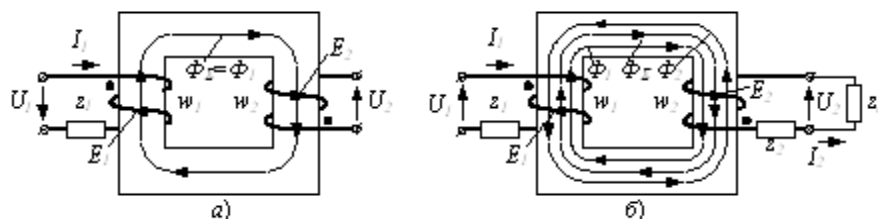


Рисунок 2.1 – Устройство и принцип действия однофазного трансформатора: холостой ход (а) и работа под нагрузкой (б)

Работа трансформатора на холостом ходу (рис.2.1,а).

Первичная обмотка  $w_1$  подключена к сети с напряжением  $U_1$  и так как из сети и обмотки образована замкнутая цепь, то по обмотке потечет переменный ток  $I_1$ . Переменный ток  $I_1$  создаст в катушке переменное магнитное поле  $\Phi_1$ , которое практически полностью будет сосредоточено в магнитопроводе. На магнитопроводе помещена вторичная обмотка  $w_2$  и переменное магнитное поле  $\Phi_1$  пересекает контуры (витки) вторичной обмотки и, поэтому в ней наведется электродвижущая сила (э.д.с.)  $E_2$ . Концы вторичной обмотки выведены наружу трансформатора и на этих выводах будет присутствовать напряжение  $U_2$ , которое в точности будет равно э.д.с.  $E_2$  (так как вторичная обмотка разомкнута). Таким образом, в трансформаторе произошло преобразование переменных напряжений:  $U_1$  преобразовалось в напряжение  $U_2$ .

Одновременно переменное магнитное поле  $\Phi_1$  пересекает контуры (витки) первичной обмотки и, поэтому в ней наведется электродвижущая сила (э.д.с.)  $E_1$ . Так как общий

(суммарный) магнитный поток  $\Phi_{\Sigma}$  одинаков для витков обоих обмоток и, поэтому, в каждом витке обмоток индуцируется одинаковая по величине э.д.с., которую обозначим как  $E_{\text{вит}}$ . Э.д.с. обмоток будут прямо пропорциональны числам их витков  $w_1$  и  $w_2$ :

$$E_1 = E_{\text{вит}} w_1, \quad E_2 = E_{\text{вит}} w_2.$$

Из формулы следует, что отношение э.д.с. обмоток равно отношению их числа витков:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{E_{\text{вит}} w_1}{E_{\text{вит}} w_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

#### Коэффициент трансформации.

Коэффициентом трансформации  $k_{mp}$  называют следующее отношение напряжений  $U_1$  и  $U_2$  на обмотках:

$$k_{mp} = \frac{U_1}{U_2}.$$

Ввиду реальной (подтвержденной опытным путем) малости падения напряжения на внутреннем сопротивлении  $z_1$  первичной обмотки, э.д.с.  $E_1$  будет практически равной напряжению  $U_1$ :  $E_1 \approx U_1$ . Для вторичной обмотки, тока в которой нет, напряжение  $U_2$  будет точно равным э.д.с.  $E_2$ :  $U_2 = E_2$ .

Формула коэффициента трансформации с учетом и примет вид:

$$k_{mp} = \frac{U_1}{U_2} \cong \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Из последней формулы следует, что коэффициент трансформации  $k_{mp}$  можно рассчитывать как конструктивную характеристику трансформатора (без подключения трансформатора к сети). Это удобно.

Если  $U_2 > U_1$ , то трансформатор называют повышающим и его  $k_{mp} < 1$ . Если  $U_2 < U_1$ , то трансформатор называют понижающим и его  $k_{mp} > 1$ .

К выводам вторичной обмотки подключается нагрузка  $z_n$  (рис.2.1,б).

В подключенной к сети первичной обмотке протекает переменный ток  $I_1$ , который создаст в магнитопроводе переменный магнитный поток  $\Phi_1$ . Переменный магнитный поток  $\Phi_1$  будет пересекать витки вторичной обмотки и, поэтому, в ней наведется переменная э.д.с.  $E_2$ . Так как вторичная обмотка вместе с сопротивлением  $z_n$  образуют замкнутый контур, то в контуре и в самой вторичной обмотке потечет переменный ток  $I_2$ . Переменный ток  $I_2$  создаст во вторичной катушке и в магнитопроводе переменное магнитное поле  $\Phi_2$ . Если напряжение  $U_1$  синусоидально, то синусоидален созданный им ток  $I_1$ , синусоидально поле  $\Phi_1$ , синусоидальны э.д.с.  $E_2$  и ток  $I_2$  и, наконец, синусоидально поле  $\Phi_2$ . Определенное по правилу Ленца магнитное поле  $\Phi_2$  будет находиться в противофазе с полем  $\Phi_1$ . Этот факт на рис.1.1,б

отражен тем, что потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  направлены в магнитопроводе встречно.

Два встречных магнитных потока создадут одно суммарное поле:

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_1 - \Phi_2.$$

Суммарное поле  $\Phi_{\Sigma}$  наводит в обоих обмотках э.д.с.  $E_1$  и  $E_2$ .

При реальных малых внутренних сопротивлениях  $z_1$  и  $z_2$  обмоток трансформатора различия между э.д.с.  $E_1$  и  $E_2$  и соответствующими напряжениями  $U_1$  и  $U_2$  незначительны (2..3%) независимо от степени загрузки трансформатора. Поэтому, при постоянном действующем значении сетевого напряжения  $U_1$  действующее значение э.д.с.  $E_1$  также будет постоянным. Если э.д.с.  $E_1$  создается переменным магнитным полем  $\Phi_{\Sigma}$ , то при постоянстве действующего значения э.д.с.  $E_1$ , также будет постоянна амплитуда магнитного потока  $\Phi_{\Sigma}$ . Это явление, наблюдающееся в трансформаторе, называется *принципом постоянства магнитного поля* в сердечнике трансформатора.

Так как  $\Phi_{\Sigma}$  связан с потоками  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  соотношением, то при возрастании тока  $I_2$  вторичной обмотки и создаваемого им магнитного потока  $\Phi_2$  должен увеличиться магнитный поток  $\Phi_1$ . Это возможно только одним путем – увеличением потребляемого из сети тока  $I_1$ . Значит,  $I_1$  отслеживает изменения тока  $I_2$ : если  $I_2$  изменится, вслед за ним пропорционально изменится ток  $I_1$ . Описанное явление называется трансформацией токов в трансформаторе. Числовой характеристикой взаимозависимости токов является коэффициент трансформации токов:

$$k_{mp.I} = \frac{I_2}{I_1}.$$

Числовое значения коэффициента трансформации токов для нагруженного трансформатора практически совпадает с базовым определением коэффициента трансформации через напряжения обмоток:  $k_{mp.I} \cong k_{mp}$ . Приравняв два и определения коэффициента трансформации (через токи и напряжения обмоток), получим:

$$k_{mp.I} \cong k_{mp} \Rightarrow \frac{U_1}{U_2} \cong \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow U_2 I_2 \cong U_1 I_1.$$

Из последнего равенства цепи (1.7) следует вывод: полные мощности первичной и вторичной обмоток практически одинаковы. Это значит, что в трансформаторе не происходит преобразования мощности, а преобразуются только напряжения и токи.

#### **Указание по технике безопасности:**

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

#### **Описание электрической схемы соединений**

Автотрансформатор А1 используется в качестве регулируемого источника синусоидального напряжения промышленной частоты. Один из однофазных трансформаторов трехфазной трансформаторной группы А2 является испытуемым. С помощью мультиметров блока Р1 контролируются напряжения первичной и вторичной обмоток испытуемого трансформатора.

Опыт выполняется по схеме (рис.2.2.)

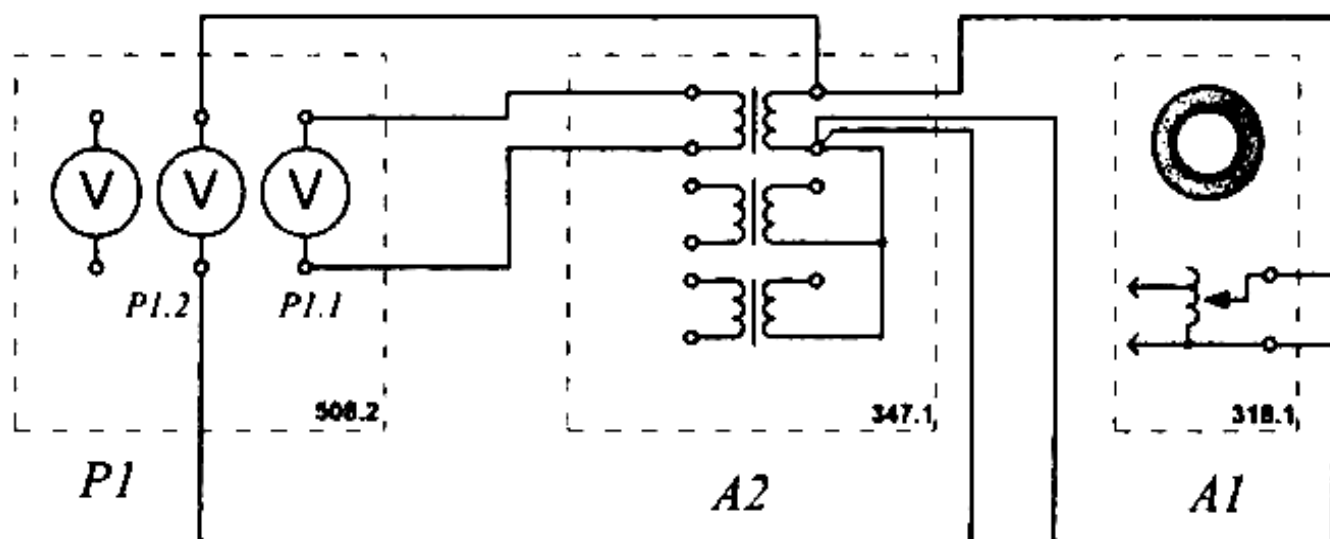


Рисунок 2.2. Электрическая схема соединений

#### Указания по проведению эксперимента

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.



2. Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" автотрансформатора А1.

3. Соедините электрическим шнуром приборную вилку электропитания

4. «220В» автотрансформатора А1 с розеткой однофазной **трехпроводной** электрической сети питания напряжением 220 В.

5. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

6. Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 в крайнее против часовой стрелки положение.

7. В трехфазной трансформаторной группе А2 переключателем установите желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора, например, 127 В.

8. Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров Р1 и автотрансформато-

ра А1.

9. Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.
10. Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1, выставьте напряжение  $U_1$  на его выходе (выводах первичной обмотки испытуемого однофазного трансформатора) равным, например 220 В.
11. Измерьте с помощью мультиметра блока Р1 напряжение  $U_2$  на выводах вторичной обмотки испытуемого однофазного трансформатора.
12. Отключите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров Р1 и автотрансформатора А1.
13. Вычислите искомый коэффициент трансформации однофазного трансформатора по формуле

$$K_{\text{тр}} = U_1 / U_2.$$

#### **Контрольные вопросы**

1. Поясните устройство трансформатора, назначение катушек и магнитопровода.
2. Объясните принцип действия трансформатора.
3. Почему в первичной обмотке, подключенной к сети, возникает э.д.с  $E_1$ ? В каком соотношении находится э.д.с  $E_1$  с напряжением сети  $U_1$ ?
4. Что такое коэффициент трансформации  $k_{\text{тр}}$  и какие варианты расчета его существуют?
5. Как создается суммарный магнитный поток  $\Phi_{\Sigma}$ ?
6. Объясните принцип постоянства суммарного магнитного потока  $\Phi_{\Sigma}$ .
7. Что такое коэффициент трансформации токов?
8. Объясните принцип постоянства полной мощности трансформатора.

**Лабораторная работа № 3. Режимы работы однофазного трансформатора. Регистрация и отображение на компьютере тока включения однофазного трансформатора на холостом ходу**

**Цель работы:** изучить особенности токов включения однофазного трансформатора на холостом ходу

**Основы теории:**

Однофазный трансформатор содержит катушки с намотанными на них обмотками, которые посажены на замкнутый сердечник (магнитопровод) из электротехнической стали. Катушки называются первичной и вторичной обмотками, которые имеют, соответственно,  $w_1$  и  $w_2$  число витков (рис.3.1). Первичная обмотка одна-единственная, а вторичных обмоток может быть больше одной. Первичная обмотка подключается к источнику переменного напряжения (в сеть)  $U_1$ . С вторичной обмотки снимается переменное напряжение  $U_2$ . Трансформатор может работать как в режиме холостого хода (х.х.), когда вторичная обмотка разомкнута (рис.3.1,а), так и под нагрузкой, когда к вторичной обмотке подключено сопротивление нагрузки (нагрузка)  $z_H$  (рис.3.1,б).

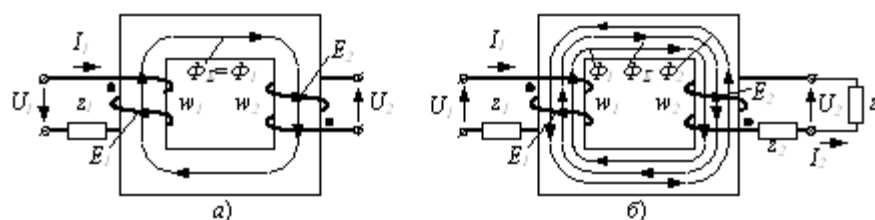


Рисунок 3.1- Устройство и принцип действия однофазного трансформатора: холостой ход(а) и работа под нагрузкой (б)

Работа трансформатора на холостом ходу (рис.3.1,а).

Первичная обмотка  $w_1$  подключена к сети с напряжением  $U_1$  и так как из сети и обмотки образована замкнутая цепь, то по обмотке потечет переменный ток  $I_1$ . Переменный ток  $I_1$  создаст в катушке переменное магнитное поле  $\Phi_1$ , которое практически полностью будет сосредоточено в магнитопроводе. На магнитопроводе помещена вторичная обмотка  $w_2$  и переменное магнитное поле  $\Phi_1$  пересекает контуры (витки) вторичной обмотки и, поэтому в ней наведется электродвижущая сила (э.д.с.)  $E_2$ . Концы вторичной обмотки выведены наружу трансформатора и на этих выводах будет присутствовать напряжение  $U_2$ , которое в точности будет равно э.д.с.  $E_2$  (так как вторичная обмотка разомкнута). Таким образом, в трансформаторе произошло преобразование переменных напряжений:  $U_1$  преобразовалось в напряжение  $U_2$ .

Одновременно переменное магнитное поле  $\Phi_1$  пересекает контуры (витки) первичной обмотки и, поэтому в ней наведется электродвижущая сила (э.д.с.)  $E_1$ . Так как общий (суммарный) магнитный поток  $\Phi_\Sigma$  одинаков для витков обеих обмоток и, поэтому, в каждом витке обмоток индуцируется одинаковая по величине э.д.с., которую обозначим как  $E_{ам}$ . Э.д.с. обмоток будут прямо пропорциональны числам их витков  $w_1$  и  $w_2$ :

$$E_1 = E_{ам} w_1, \quad E_2 = E_{ам} w_2.$$

### *Переходные процессы при включении трансформатора в сеть*

При включении трансформатора на холостом ходу вторичная обмотка разомкнута и схема замещения трансформатора (рис.3.2,а) будет такой же, как в опыте холостого хода.

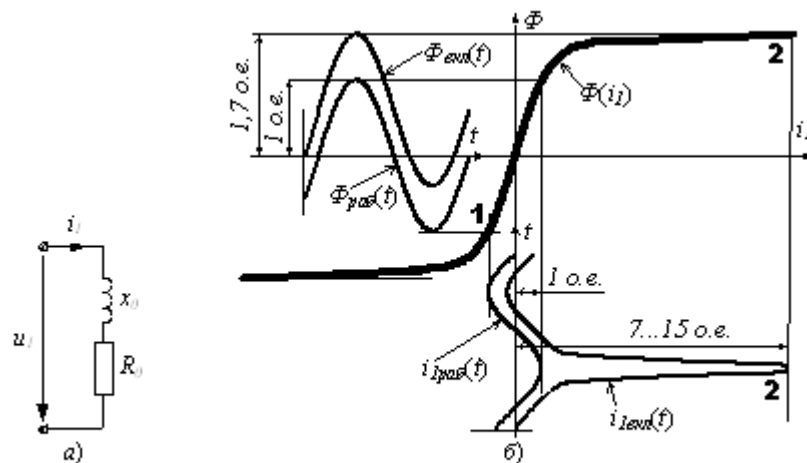


Рисунок 3.2- Процессы при включении трансформатора на холостом ходу: схема замещения (а) и графики сигналов (б)

Дифференциальное уравнение трансформатора

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) = L_0 \frac{di_1}{dt} + R_0 i_1$$

При синусоидальном входном напряжении  $u_1$  потокосцепление  $\psi$  и магнитный поток  $\Phi$  в сердечнике будут синусоидальными. Но ток  $i_1$  из-за насыщения стали магнитопровода будет несинусоидальным. Используя определение потокосцепления  $\psi = w\Phi = L_0 i_1$ , перепишем в виде

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) = w \frac{d\Phi}{dt} + \frac{R_0}{L_0(i_1)} w\Phi,$$

где индуктивность  $L_0(i_1)$  при постоянстве потокосцепления  $\psi = L_0 i_1$  зависит обратно пропорционально от тока  $i_1$ .

Индуктивность  $L_0$  мала на участках насыщения магнитопровода (рис.4.3,б). В переходных процессах значение магнитного потока  $\Phi(t)$  только очень малую часть периода его изменения заходит на участок насыщения магнитопровода. Поэтому, оправдано использование в расчетах ненасыщенного значения индуктивности  $L_0$ :  $L_0(i_1) \rightarrow L_0(0) \equiv L_0$ .

### Решение дифференциального уравнения

$$\Phi = \frac{U_{1m}}{w} \left[ \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi) - \sin(\alpha_0 - \varphi) \cdot e^{-\frac{R_0}{L_0} t} \right]$$

Из-за апериодической (экспоненциальной) составляющей решения график потокосцепления  $\Phi(t)$  сместится в худшем случае на 70...80% ,т.е. амплитудное значение  $\Phi(t)$  вырастет в 1,7...1,8 раз. На рис.4.3,б как раз показано изменение амплитуды  $\Phi(t)$  в 1,7 раза с образованием графика  $\Phi_{вкл}(t)$ . Построения с использованием кривой намагничивания  $\Phi(i_1)$  стали магнитопровода графика тока  $i_{лвкл}(t)$  дали искаженной график тока с амплитудой превышающей амплитуду тока рабочего режима  $i_{лраб}(t)$  в 7...15 раз. Затухание амплитуды магнитного потока  $\Phi_{вкл}(t)$  до значения  $\Phi_{раб}(t)$  происходит с постоянной времени  $T_0=L_0/R_0$ . У трехфазных силовых трансформаторов большой мощности (сотни-тысячи киловатт) постоянная времени  $T_0$  велика и равна нескольким секундам. Поэтому, при включении таких трансформаторов импульсы тока  $i_{лвкл}(t)$  существуют достаточно долго, в течение нескольких единиц-десятков секунд и могут стать причиной отключения трансформатора устройствами его защиты по току короткого замыкания. Для того, чтобы при включении трансформатора длительно действующие импульсы тока не приводили к отключению трансформатора, должна быть применена специальная защита, различающая токи короткого замыкания и импульсы тока при включении на холостом ходу.

#### **Указание по технике безопасности:**

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

#### **Описание электрической схемы соединений**

Источник G1- источник синусоидального напряжения промышленной частоты. Один из однофазных трансформаторов трехфазной трансформаторной группы А2 является испытуемым. Измерительный трансформатор тока (трансдуктор) в блоке А3 обеспечивает гальваническую развязку силовой и измерительной цепей и преобразует ток первичной обмотки испытуемого трансформатора в пропорциональное ему нормированное напряжение. Через аналоговый вход АСН0-АСН8 коннектора А4 измеряемое напряжение вводится в компьютер А5.

Схема для регистрации тока включения трансформатора на холостом ходу представлена на рис 3.3



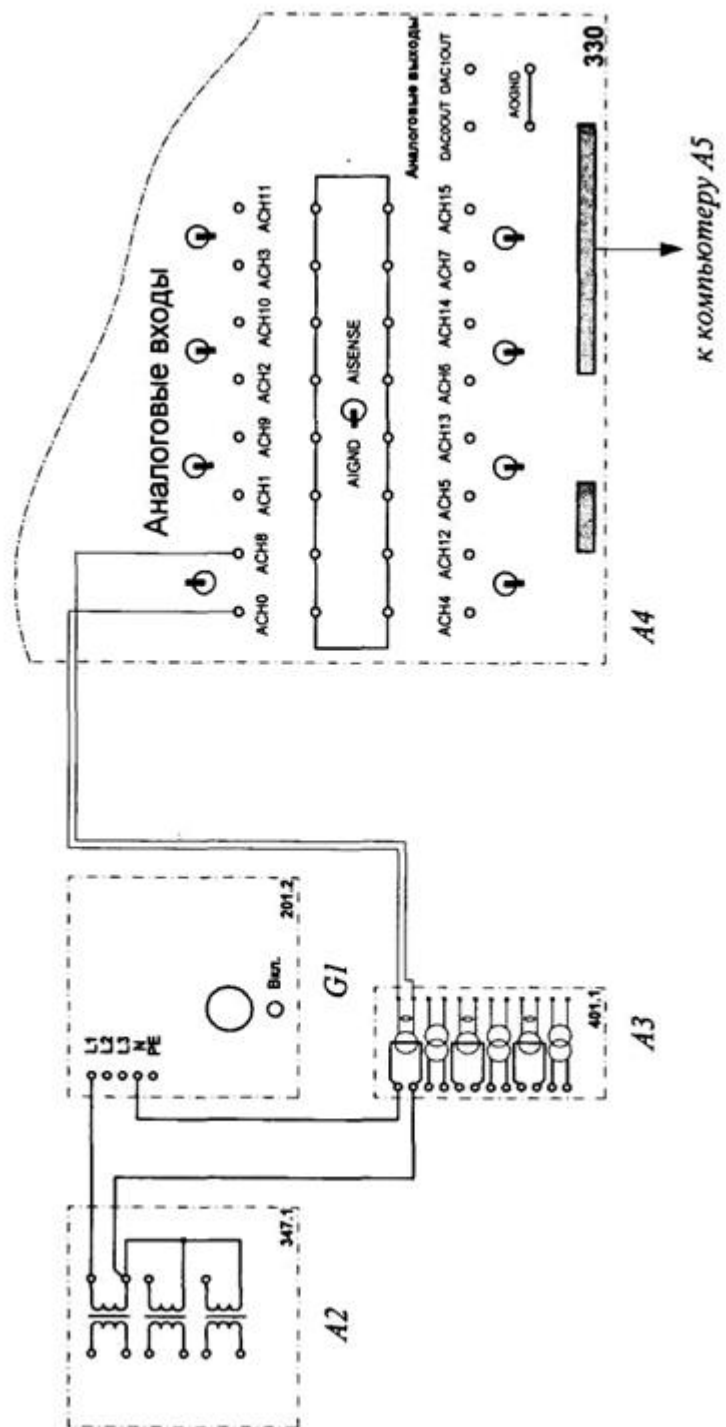


Рис. 3.3. Электрическая схема соединений

### Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания .
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А5 и запустите программу "Многоканальный осциллограф". Настройте программу для запоминания, например, последних 5 секунд процесса.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения источника G1.
- Включите ключ-выключатель источника G1.
- Нажмите кнопку «ВКЛ» включения сканирования первого канала виртуального осциллографа.
- Нажмите кнопку "ВКЛ" источника G1 и через 1-2 секунды после этого остановите сканирование данных программой «Многоканальный осциллограф» нажатием на виртуальную кнопку «Остановить».
- Нажмите на кнопку-гриб источника G1.
- Используя возможности программы "Многоканальный осциллограф", проанализируйте полученную временную зависимость тока включения однофазного трансформатора без нагрузки.

### Контрольные вопросы

1. Обоснуйте вид схемы замещения трансформатора при его включении, составьте по схеме дифференциальное уравнение и обоснуйте правомерность использования в расчетах ненасыщенного значения индуктивности  $L_0$ .
2. Как выглядят графики магнитного потока и тока трансформатора при его включении?
3. Почему мощные силовые трансформаторы должны быть предусмотрены меры отключения защитой при его вводе в работу?

# Лабораторная работа № 4. Режимы работы однофазного трансформатора. Регистрация и отображение на компьютере тока короткого замыкания однофазного трансформатора

**Цель работы:** изучить кривые токов короткого замыкания однофазного трансформатора

## Основы теории:

Однофазный трансформатор содержит катушки с намотанными на них обмотками, которые посажены на замкнутый сердечник (магнитопровод) из электротехнической стали. Катушки называются первичной и вторичной обмотками, которые имеют, соответственно,  $w_1$  и  $w_2$  число витков (рис.4.1). Первичная обмотка одна-единственная, а вторичных обмоток может быть больше одной. Первичная обмотка подключается к источнику переменного напряжения (в сеть)  $U_1$ . С вторичной обмотки снимается переменное напряжение  $U_2$ . Трансформатор может работать как в режиме холостого хода (х.х.), когда вторичная обмотка разомкнута (рис.4.1,а), так и под нагрузкой, когда к вторичной обмотке подключено сопротивление нагрузки (нагрузка)  $z_H$  (рис.4.1,б).

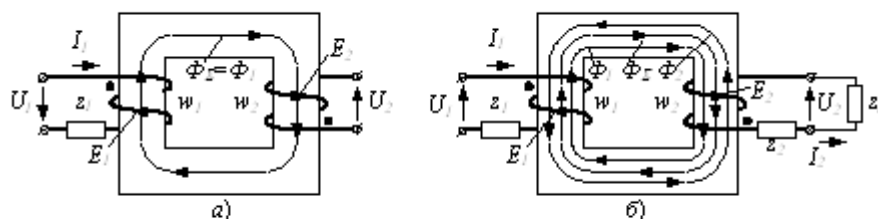


Рисунок 4.1- Устройство и принцип действия однофазного трансформатора: холостой ход(а) и работа под нагрузкой (б)

При коротком замыкании по обмоткам трансформатора протекают большие токи, в сравнении с которыми ток  $I_0$  цепи намагничивания чрезвычайно мал. Поэтому можно в расчетах использовать простейшую схему замещения трансформатора. Схема трансформатора в режиме к.з. представлена на рис.4.2. В расчетах используется мгновенное значение напряжения  $u_1$  питания трансформатора, и для тока к.з.  $i_{кз}$  рассчитывается также мгновенное значение. До момента к.з. трансформатор работал вхолостую.

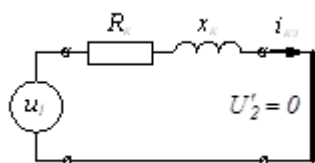


Рисунок 4.2- Расчетная схема к.з трансформатора

Дифференциальное уравнение схемы имеет вид

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) = L_k \frac{di_{кз}}{dt} + R_k i_{кз}$$

Общее решение дифференциального уравнения равно

сумме принужденной составляющей  $i_{np}$  и свободной  $i_{св}$ :

$$i_{кз} = i_{np} + i_{св}$$

Принужденная составляющая тока  $i_{св}$  является током установившегося режима. Ток  $i_{np}$  определяется для установившегося режима схемы, и при входном синусоидальном напряжении  $u_1$  ток также синусоидальный, но отстающий от напряжения на электрический угол:

$$\varphi = \arctg \frac{x_k}{R_k} \quad i_{np} = \frac{U_{1m}}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi)$$

Вид свободной составляющей тока  $i_{св}$  к.з. зависит от корней характеристического уравнения, составленного на основе дифференциального уравнения :

$$L_k p + R_k = 0 \Rightarrow p = -\frac{R_k}{L_k} \Rightarrow i_{св} = C \cdot e^{-\frac{R_k}{L_k} t}$$

Общее решение в соответствии с (5.4) и с учетом найденных значений  $i_{np}$  и  $i_{св}$  имеет вид

$$i_{кз} = \frac{U_{1m}}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi) + C \cdot e^{-\frac{R_k}{L_k} t}$$

Постоянную интегрирования  $C$  находим из начального условия: в момент времени  $t=0$  ток трансформатора нулевой (до к.з. трансформатор работал вхолостую):

$$0 = \frac{U_{1m}}{Z_k} \sin(\omega 0 + \alpha_0 - \varphi) + C \cdot e^{-\frac{R_k}{L_k} 0} \Rightarrow C = -\frac{U_{1m}}{Z_k} \sin(\alpha_0 - \varphi)$$

Общее решение примет вид

$$i_{кз} = \frac{U_{1m}}{Z_k} \left[ \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi) - \sin(\alpha_0 - \varphi) \cdot e^{-\frac{R_k}{L_k} t} \right]$$

Вид графика тока к.з., построенного по выражению (5.6), зависит от начальной фазы  $\alpha_0$  напряжения сети  $u_1$  в момент короткого замыкания (рис.5.7).

При  $\alpha_0 - \varphi = 0$  ток к.з.  $i_{кз}$  не будет содержать свободной составляющей, так как  $\sin(\alpha_0 - \varphi) = 0$ . Ток к.з. станет сразу установившимся с амплитудой  $U_{1m}/Z_k$  и действующим значением  $U_1/Z_k$  (рис.1.20,а) Произведем оценку этого тока:

$$\begin{aligned} I_{кз.уст} &= \frac{U_1}{Z_k} = \frac{U_1 I_{1.ном}}{Z_k I_{1.ном}} = \frac{U_1 I_{1.ном}}{U_{кз}} = \frac{U_1}{U_{кз}} I_{1.ном} = \\ &= \frac{U_1}{(0,045...0,07)U_1} I_{1.ном} = (14...22) I_{1.ном} \end{aligned}$$

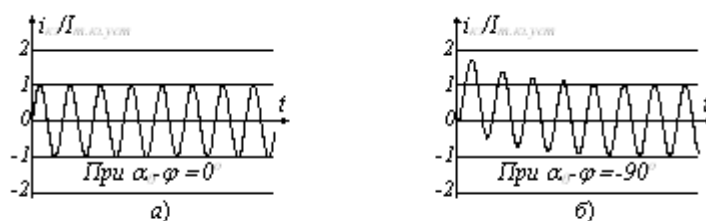


Рисунок 4.3- Ток короткого замыкания только с принужденной составляющей (а) и с максимальным действием свободной составляющей (б)

Установившийся ток к.з. трансформатора в 14...22 раза больше номинального и он опасен для трансформатора, так как:

- приводит к быстрому разогреву обмоток и обугливанию изоляции провода обмоток;

- сопровождается большими динамическими усилиями притяжения соседних витков обмоток (усилия увеличиваются в  $14^2...22^2 \approx 200...500$  раз) и приводит к механическому разрушению (растрескиванию) изоляции.

Трансформатор должен быть немедленно отключен от сети.

При  $\alpha_0 - \varphi = -90^\circ$  ток к.з.  $i_{kz}$  будет содержать свободную составляющую с максимальной ее интенсивностью, так как  $\sin(\alpha_0 - \varphi) = -1$ . Синусоидальная (принужденная) составляющая тока к.з. будет максимально смещена вверх (рис.5.7,б). Максимальное значение тока к.з., образующееся в этом случае, называется ударным током  $I_{y\partial}$ . Ток к.з. достигает наибольшего (ударного) значения примерно в тот момент времени  $t_{y\partial}$ , когда будет максимум принужденной составляющей при  $\sin(\omega t_{y\partial} + \alpha_0 - \varphi) = 1$ :

$$I_{y\partial} = \sqrt{2} I_{kz, ych} \left( 1 + e^{-\frac{R_k t_{y\partial}}{L_k}} \right)$$

Значение выражения, заключенного в скобки в , для существующих трансформаторов составляет  $\approx 1,7...1,8$ . С учетом оценки значение ударного тока составляет

$$I_{y\partial} = \sqrt{2} I_{1, nom} (14...22) \cdot (1,7...1,8) = (34...59) I_{1, nom}$$

Протекание столь большого тока по обмоткам трансформатора сопровождается большими динамическими усилиями притяжения соседних витков обмоток, а в защитной аппаратуре, отключающей трансформатор от сети, интенсивно обгорают контакты. Поэтому, выбор отключающих автоматов защиты должен вестись с учетом ударного тока  $I_{y\partial}$ .

### ***Указание по технике безопасности:***

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

### **Описание электрической схемы соединений**

Источник G1- источник синусоидального напряжения промышленной частоты (4.4). Один из однофазных трансформаторов трехфазной трансформаторной группы A2 является испытуемым. Измерительный трансформатор тока (трансдуктор) в блоке A3 обеспечивает гальваническую развязку силовой и измерительной цепей и преобразует ток первичной обмотки испытуемого трансформатора в пропорциональное ему нормированное напряжение. Через аналоговый вход АСН0-АСН8 коннектора A4 измеряемое напряжение вводится в компьютер A5. Выключатель A6 выполняет роль короткозамыкателя. Реостат A13 ограничивает ток короткого замыкания.

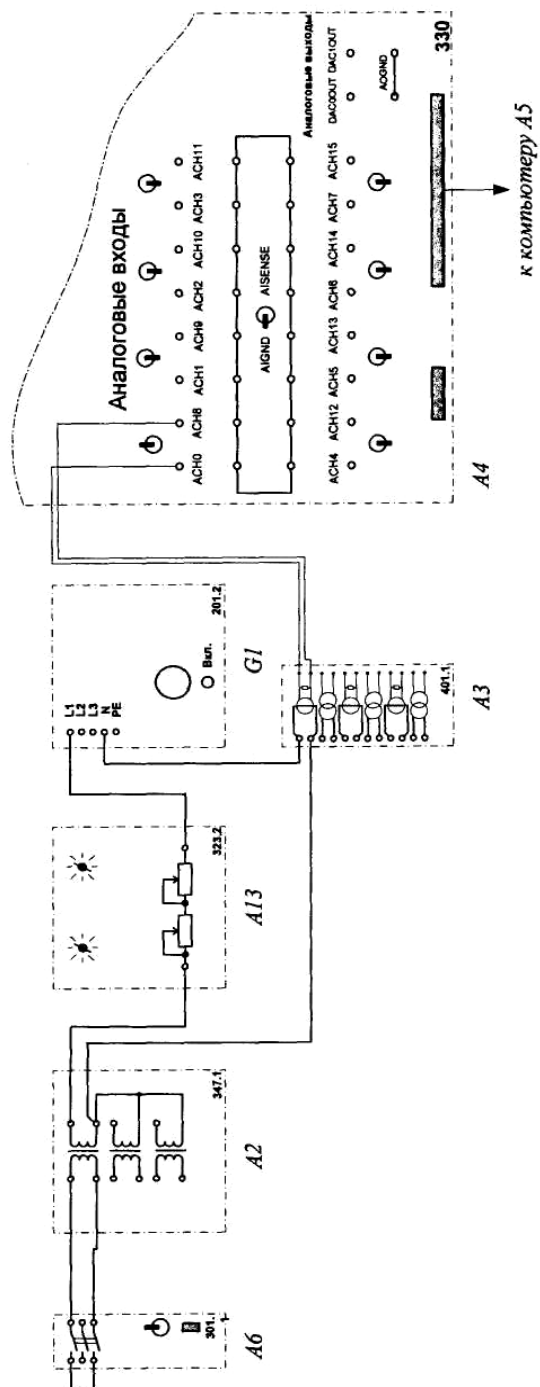


Рисунок 4.4.- Электрическая схема соединений

#### Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления  устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

- В трехфазной трансформаторной группе А2 переключателем установите желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора, например, 127 В.
- Установите суммарное сопротивление реостата А13 равным, например, 150 Ом.
- Переключатель режима работы трехфазного выключателя А6 переведите в положение «РУЧН.».
- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А5 и запустите прикладную программу «Многоканальный осциллограф». Настройте программу для запоминания, например, последних 5 секунд процесса.
  - Включите выключатель «СЕТЬ» выключателя А6.
  - Включите источник G1.
  - Нажмите кнопку «ВКЛ» включения сканирования первого канала виртуального осциллографа.
  - Нажмите кнопку «ВКЛ» и спустя 1 с (**не более**) - кнопку «ВЫКЛ» выключателя А6 и еще через 1 с после этого остановите сканирование данных программой «Многоканальный осциллограф».
  - Нажмите на кнопку-гриб источника G1 и отключите выключатель «СЕТЬ» выключателя А6.
  - Используя возможности программы «Многоканальный осциллограф», проанализируйте полученную временную зависимость тока короткого замыкания.

### **Контрольные вопросы**

1. Как выглядит схема замещения трансформатора в режиме к.з.?
2. Как рассчитывают принужденную  $i_{пр}$  и свободную  $i_{св}$  составляющие тока к.з.?
3. Каковы оценки значения установившегося тока к.з. и чем он опасен для трансформатора?
4. Каковы оценки значения ударного тока к.з. и чем он опасен для трансформатора и защитной аппаратуры?



**Лабораторная работа № 5. Трехфазные трансформаторы. Определение группы соединений обмоток трехфазного трансформатора.**

**Цель работы:** изучить работу трансформаторов с различными группами соединения

**Основы теории:**

В сетях электроснабжения на подстанциях устанавливается не менее двух трехфазных трансформаторов, что дает следующие преимущества (в сравнении с использованием для электропитания только одного трансформатора):

1). Повышается надежность электроснабжения за счет резервирования при использовании более одного трансформатора.

2). Обеспечивается экономичная работа трансформаторной подстанции, в которой нагрузка параллельно работающих трансформаторов может поддерживаться на уровне максимально приближенной к нагрузке  $0,7...0,8$ , на которой к.п.д. трансформатора максимально. Так, если нагрузка двух параллельно работающих трансформаторов составляет  $0,35...0,4$ , то при выводе из работы одного трансформатора, оставшийся в работе трансформатор загрузится до  $0,7...0,8$ .

3). Исключается перегрузка трансформаторов. Так, если работающие трансформаторы нагружены токами, превышающими номинальные, то можно ввести дополнительно в работу еще один трансформатор, который возьмет на себя часть тока нагрузки, разгрузив от токов другие трансформаторы.

Для реализации параллельной работы трехфазных трансформаторов должны быть выполнены следующие условия (рис.5.1):

1). Должны быть одинаковыми высокое (ВН) и низкое напряжение (НН) трансформаторов и, следовательно, коэффициенты трансформации. При невыполнении этого условия к замкнутой цепи, состоящей из параллельно включенных, например, двух трансформаторов, с разными напряжениями  $U_{21}$  и  $U_{22}$

вторичных обмоток, прикладывается разностное напряжение  $\Delta U_2 = U_{21} - U_{22}$  (рис.6.1,а). Напряжением  $\Delta U_2$  в замкнутой цепи создается уравнивающий ток  $I_{ур}$ , который разогревает обмотки обоих трансформаторов даже на холостом ходу их. Так, если  $\Delta U_2$  составляет всего лишь  $(0,04...0,07)U_{2ном}$ , то уравнивающий ток равен номинальному току. В этом случае к трансформатору нельзя подключать никакой нагрузки.

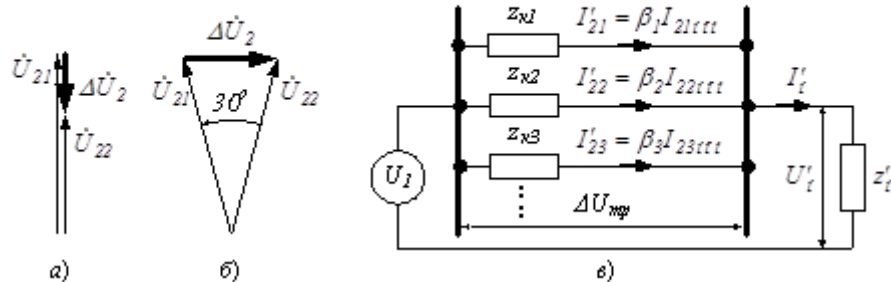


Рисунок 5.1-Векторные диаграммы вторичных напряжений параллельно работающих трансформаторов при неравенстве вторичных напряжений (а), несовпадении групп соединения (б) и схема к расчету при неравенстве напряжений короткого замыкания (в)

2). Должны быть одинаковые группы соединения обмоток трансформаторов: либо все трансформаторы должны иметь группу 0, либо 11. У трансформаторов с группами 0 и 11 сдвиг между линейными напряжениями вторичных обмоток составляет  $30^\circ$ . При невыполнении этого условия к замкнутой цепи, состоящей из параллельно включенных, например, двух трансформаторов, с равными напряжениями  $U_{21}$  и  $U_{22}$  вторичных обмоток, прикладывается разностное напряжение  $\Delta \dot{U}_2 = \dot{U}_{21} - \dot{U}_{22}$ , которое составляет  $0,52 \cdot U_{2ном}$ , где  $0,52 = 2 \cdot \sin 15^\circ$  (рис.5.1,б). При таком  $\Delta U_2$  по обмоткам обоих трансформаторов протекает уравнивающий ток  $I_{ур}$  близкий к току короткого замыкания.

3). При подключении к общим шинам подстанции чередование фаз трансформаторов должно быть одинаковым, например, к шине А, подключать все выводы обмоток, отмеченные буквой А. Также должно быть одинаковое чередование фаз и во вторичной цепи параллельно включенных трансформаторов. При невыполнении этого условия создается режим короткого замыкания трансформаторов. Трансформаторы будут отключены защитой.

4). Напряжения короткого замыкания  $U_{кз}$  должно быть одинаковым у всех трансформаторов. При невыполнении этого условия коэффициенты загрузки  $\beta$  параллельно работающих трансформаторов будут разными и, следовательно, часть трансформаторов будут недогружены, а другие – будут перегружены. Для пояснения этого явления приведем расчеты по схеме, приведенной на рис.5.1,в.

Трансформаторы, которые считаем загруженными, изображены простейшей схемой замещения в виде сопротивления  $\dot{z}_\epsilon = R_\epsilon + jx_\epsilon$  короткого замыкания Из схемы (рис.5.1,в) следует:

- падение напряжения  $\Delta U_{тр}$  для всех трансформаторов одинаковое;
- для каждого трансформатора напряжение  $\Delta U_{тр}$  вычисляется по формуле

$$\begin{aligned}\Delta U_{mp} &= z_{\kappa 1} I'_{21} = z_{\kappa 1} \beta_1 I'_{21ном} = z_{\kappa 1} I'_{21ном} \beta_1 = U_{\kappa 31} \beta_1, \\ \Delta U_{mp} &= z_{\kappa 2} I'_{22} = z_{\kappa 2} \beta_2 I'_{22ном} = z_{\kappa 2} I'_{22ном} \beta_2 = U_{\kappa 32} \beta_2, \\ \Delta U_{mp} &= z_{\kappa 3} I'_{23} = z_{\kappa 3} \beta_3 I'_{23ном} = z_{\kappa 3} I'_{23ном} \beta_3 = U_{\kappa 33} \beta_3,\end{aligned}$$

где  $\beta$  – коэффициент загрузки трансформатора, равный отношению тока  $I'_2$  трансформатора к его номинальному значению  $I'_{2н}$  ;

$z_{\kappa} I'_{2н}$  равно напряжению короткого замыкания  $U_{\kappa 3}$  трансформатора (рис.1.5,в).

Если напряжения короткого замыкания  $U_{\kappa 31}$ ,  $U_{\kappa 32}$  и  $U_{\kappa 33}$  всех параллельно работающих трансформаторов одинаковые, то при одном и том же значении  $\Delta U_{mp}$  из (6.2) следует совпадение коэффициентов загрузки трансформаторов:

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$$

Вводная часть.

Явления, которые будут рассмотрены ниже основаны на учете нелинейности кривой намагничивания стали магнитопровода трехфазного трансформатора. Эти рассмотрения предваряем следующими положениями:

- ввиду малости отличия напряжения на обмотке трансформатора  $U$  и индуцируемой в ней переменным магнитным потоком э.д.с.  $E$ , принимаем  $U \approx E$ ;
- мгновенное значение э.д.с.  $e$ , индуцируемой переменным магнитным потоком  $\Phi$  и поток связаны зависимостью

$$e(t) = -w \frac{d\Phi(t)}{dt}.$$

- если магнитный поток  $\Phi(t)$  изменяется по гармоническому закону (синусоидален), то в соответствии с (6.3) также синусоидальна э.д.с.  $e(t)$  и при несинусоидальном потоке  $\Phi(t)$  также несинусоидальна э.д.с.  $e(t)$ ;

- несинусоидальный поток  $\Phi(t)$  или ток  $i(t)$  в обмотке трансформатора представляем в виде суммы гармонических составляющих, в которых содержится основная гармоника с частотой питающего трансформатор напряжения ( $50 \text{ Гц}$ ) и ближайшая гармоника с утроенной частотой  $150 \text{ Гц}$ .

Пусть ток  $i(t)$  в обмотке трансформатора синусоидален (рис.5.2,а). Используя кривую намагничивания магнитопровода трансформатора, строим график изменения во времени магнитного потока  $\Phi(t)$ :

- задаемся одинаковым временем по осям  $t$  для графиков  $i(t)$  и  $\Phi(t)$ , отложив точки 1 и 2 на одинаковых расстояниях от относительно точек  $0_{i(t)}$  и  $0_{\Phi(t)}$  начала отсчета по времени для графиков  $i(t)$  и  $\Phi(t)$ ;

- по точке 1 находим значение тока  $i(t)$  в точке 3, затем находим точку 4 на графике  $\Phi(i)$ ;

- на пересечении линий 2-5 и 4-5 находим точку графика  $\Phi(t)$ .

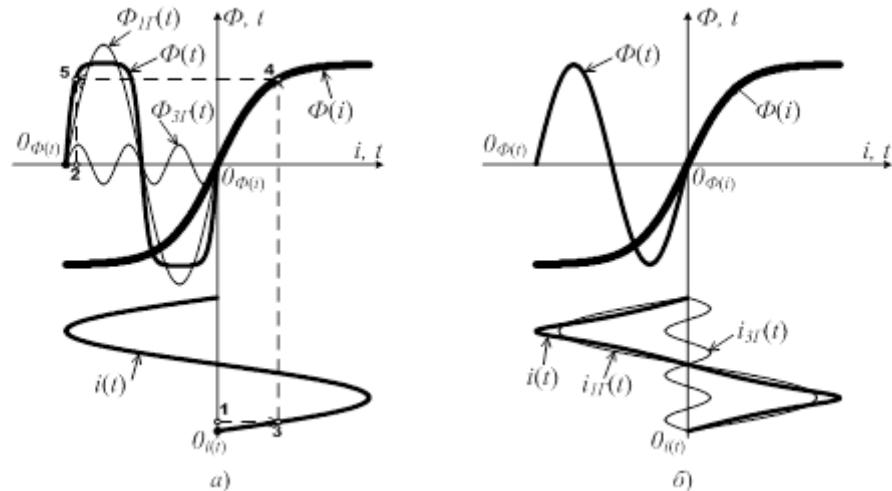


Рисунок 5.2- Графики сигналов магнитного потока  $\Phi(t)$  и порождающего его тока  $i(t)$  при синусоидальном токе (а) и магнитном потоке (б)

По построениям получен несинусоидальный график  $\Phi(t)$ . В соответствии с (6.3) индукционная э.д.с.  $e(t)$  будет несинусоидальной и, следовательно, будет несинусоидальным напряжение  $u(t)$  на обмотке трансформатора. Несинусоидальный поток  $\Phi(t)$  может быть представлен в виде суммы гармонических составляющих  $\Phi_{1\Gamma}(t)$  и  $\Phi_{3\Gamma}(t)$ . Точно также напряжение  $u(t)$  может быть представлено в виде суммы гармонических составляющих  $u_{1\Gamma}(t)$  и  $u_{3\Gamma}(t)$ .

Пусть магнитный поток  $\Phi(t)$  в магнитопроводе трансформатора синусоиден (рис.5.2,б). В соответствии с индукционной э.д.с.  $e(t)$  будет синусоидальной и, следовательно, будет синусоидальным напряжение  $u(t)$  на обмотке трансформатора. Используя кривую намагничивания магнитопровода трансформатора, строим график изменения во времени тока  $i(t)$  в обмотке трансформатора.

По построениям получен несинусоидальный график  $i(t)$ . Несинусоидальный поток  $i(t)$  может быть представлен в виде суммы гармонических составляющих  $i_{1\Gamma}(t)$  и  $i_{3\Gamma}(t)$ .

Считаем линейные и фазные напряжения первичных обмоток синусоидальными. Определим форму вторичного напряжения трансформатора при заданной схеме соединения его обмоток.

#### 1. Схема соединения обмоток

Так как по линейным и нулевому проводу к первичной обмотке трансформатора подведено синусоидальное напряжение, то и в соответствии с (6.3) будет синусоидальным магнитный поток  $\Phi(t)$ . Этим потоком во вторичной обмотке будет наведена синусоидальная э.д.с. и, следовательно, фазные и линейные напряжения на вторичной обмотке будут синусоидальными. В соответствии с рис 5.3,б токи первичных обмоток  $i(t)$  будут несинусоидальными

и в них будут присутствовать гармонические токи  $i_{1l}(t)$  и  $i_{3l}(t)$ . Сумма первых гармоник  $i_{1l}(t)$ , сдвинутых относительно друг друга на  $120^\circ$  электрических градусов, будет равна нулю. Третьи гармоники  $i_{3l}(t)$  будут синфазными и их сумма не будет нулевой. Суммарный ток третьих гармоник потечет по нулевому проводу. Следовательно, режим синусоидальных магнитных потоков  $\Phi(t)$  осуществим, а на вторичной обмотке напряжения будут идеальными по форме – синусоидальными. Однако такое включение на практике не применяется, так как первичное напряжение, приходящее с линий электропередачи, всегда подводится с помощью трех линейных проводов, а нулевого провода в сети просто нет.

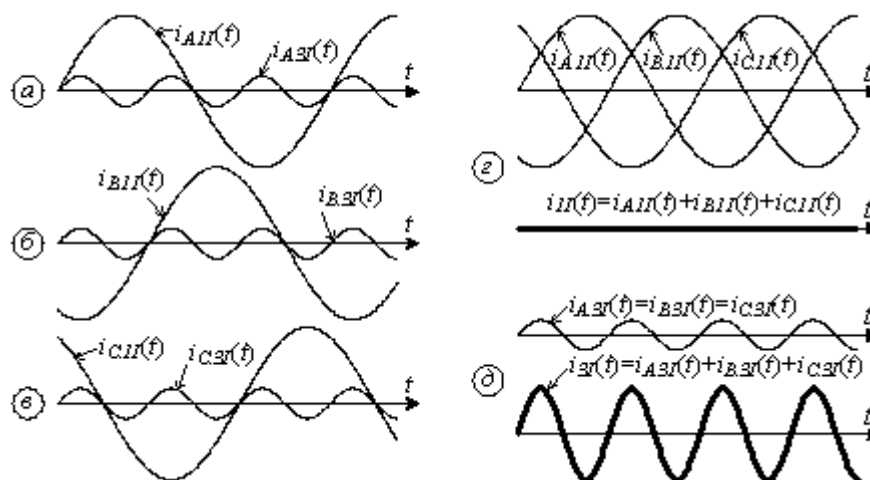


Рисунок 5.3- Гармонически составляющие токов фазы А(а), фазы В(б), фазы С(в) и суммы первых (г) и третьих (д) гармонических составляющих

## 2. Схема соединения обмоток Y/Y (группа 0).

Так как линейного провода нет, то к трансформатору подводятся только линейные синусоидальные напряжения. Докажем, что токи первичных обмоток будут синусоидальными. Предположим обратное – токи первичных обмоток несинусоидальные. Тогда в таких токах помимо основной гармоники должна существовать третья гармоника (рис.5.3,б). Третьи гармоники будут синфазными и сумма их не будет нулевой. Однако для суммарного тока третьих гармоник нет провода, по которому он потёк бы. Следовательно, третьих гармоник в первичных токах не может быть и первичные токи только синусоидальные. При синусоидальных первичных токах магнитные потоки обмоток будут несинусоидальными (рис.5.3,а). В соответствии с во вторичных обмотках будут наведены несинусоидальные э.д.с., а вторичные напряжения будут несинусоидальными. Недостатком трансформатора с соединением обмоток Y/Y (группа 0) в том, что со вторичной обмотки к потребителям подается несинусоидальное (искаженное по форме) трехфазное напряжение.

## 2. Схема соединения обмоток Y/Δ (группа 11).

Так же как и предыдущем случае с группой 0 во вторичных обмотках индуцируются несинусоидальные фазные э.д.с. Сумма первых гармоник указанных э.д.с., сдвинутых от-

носительно друг друга на  $120^\circ$  электрических градусов, будет равна нулю. Третьи гармоники э.д.с. будут синфазными и их сумма не будет нулевой. Суммарная э.д.с. третьей гармоники создаст в замкнутой цепи вторичных обмоток контурный ток, который создаст в сердечниках трансформатора магнитные потоки утроенной частоты. Эти потоки, в соответствии с правилом Ленца будут находиться в противофазе к магнитным потокам третьей гармоники, сформировавшиеся в первичной обмотке. Так эти потоки третьих гармоник практически равны друг другу, то они практически взаимно компенсируются. В итоге, в сердечнике трансформатора останется только поток первой гармоник и, следовательно, вторичные напряжения будут синусоидальными.

Из рассмотренных вариантов схем включения и питания обмоток трансформатора предпочтительной является схема Y/Δ с группой 11. Именно такие трансформаторы целесообразно ставить на вводе подстанции.

#### ***Указание по технике безопасности:***

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

#### **Описание электрической схемы соединений**

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты. Трехфазная трансформаторная группа A2 является испытуемой. Измерительные трансформаторы напряжения в блоке A3 обеспечивают гальваническую развязку силовой и измерительной цепей и преобразуют первичное и вторичное линейные напряжения испытуемого трансформатора в пропорциональные им нормированные напряжения. Через аналоговые входы АСН0-АСН8 и АСН1-АСН9 коннектора A4 измеряемые напряжения вводятся в компьютер A5.

Электрическая схема соединений представлена на рис. 5.4.

Схема соединений

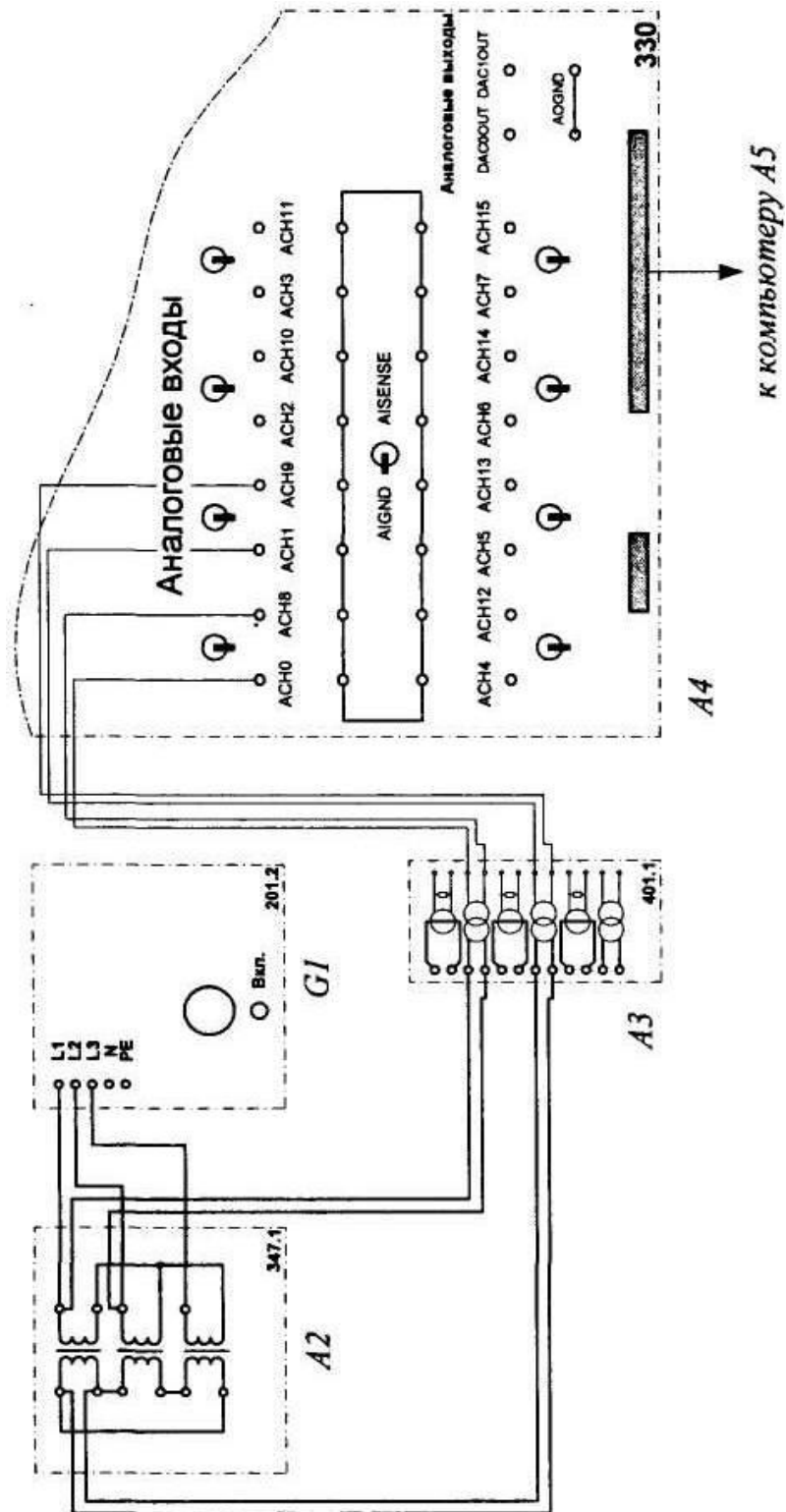


Рисунок 5.4- Схема соединений

#### Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания G1.

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- В трехфазной трансформаторной группе А2 переключателем установите желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора, например, 220В.
- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А5 и запустите прикладную программу "Многоканальный осциллограф".
- Включите источник G1.
- Нажмите кнопки «ВКЛ» включения сканирования первого и второго каналов виртуального осциллографа.
- Используя возможности программы "Многоканальный осциллограф", определяйте взаимный фазовый сдвиг между кривыми регистрируемых напряжений и по нему определяйте группу соединений обмоток трехфазного трансформатора.
- По завершении эксперимента отключите источник G1.

### **Контрольные вопросы**

1. Почему при синусоидальном токе в обмотке трансформатора магнитный поток, э.д.с. и напряжение обмотки несинусоидальное?
2. Почему при синусоидальном магнитном потоке в магнитопроводе трансформатора э.д.с., напряжение обмотки будут синусоидальными, а ток - несинусоидальным?
3. Обоснуйте синусоидальную форму вторичного напряжения трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток  $\mathbf{Y/Y}$ .
4. Обоснуйте несинусоидальную форму вторичного напряжения трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток  $\mathbf{Y/Y}$ .
5. Обоснуйте синусоидальную форму вторичного напряжения трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток  $\mathbf{Y/\Delta}$ .



**Лабораторная работа № 6. Параллельная работа и специальные типы трансформаторов. Определение уравнительного тока, вызванного неравенством коэффициентов трансформации.**

**Цель работы:** изучить условия появления уравнительного тока

**Теоретическая часть:**

- Основные теоретические сведения.

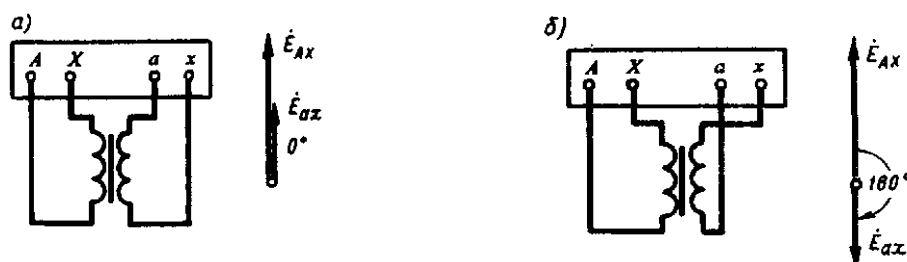


Рис. 6.1. Группы соединения обмоток однофазных трансформаторов:

*a* — группа I/I — 0; *б* — группа I/I — 6.

До сих пор при построении векторных диаграмм трансформатора считалось, что ЭДС фазы обмотки ВН  $\dot{E}_{AX}$  и обмотки НН  $\dot{E}_{ax}$  совпадают по фазе. Но это справедливо лишь при условии намотки первичной и вторичной обмоток трансформатора в одном направлении и одноименной маркировке выводов этих обмоток, как показано на рис.7.1, *a*. Если же в трансформаторе изменить направление обмотки НН или же переставить обозначения ее выводов, то ЭДС  $\dot{E}_{ax}$  окажется сдвинутой по фазе относительно ЭДС  $\dot{E}_{AX}$  на  $180^\circ$  (рис. 7.1, *б*). Сдвиг фаз между ЭДС  $\dot{E}_{AX}$  и  $\dot{E}_{ax}$  принято выражать группой соединения. Так как этот сдвиг фаз может изменяться от 0 до  $360^\circ$ , а кратность сдвига составляет  $30^\circ$ , то для обозначения группы соединения принят ряд чисел: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 и 0.

Угол смещения вектора линейной ЭДС обмотки НН по отношению к вектору линейной ЭДС обмотки ВН определяют умножением числа, обозначающего группу соединения, на  $30^\circ$ . Угол смещения отсчитывают от вектора ЭДС обмотки ВН по часовой стрелке до вектора ЭДС обмотки НН. Например, группа соединения 5 указывает, что вектор ЭДС НН отстает по фазе от вектора ЭДС ВН на угол  $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$ .

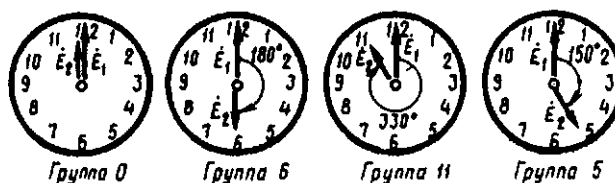


Рис. 6.2. Сравнение положения стрелок часов с обозначением групп соединения.

Для лучшего понимания принятого обозначения групп соединения пользуются сравнением с часами. При этом вектор ЭДС обмотки ВН соответствует минутной стрелке, установленной на цифре 12, а вектор ЭДС обмотки НН — часовой стрелке (рис.6.2). Так же необходимо иметь в виду, что совпадение по фазе векторов ЭДС  $\dot{E}_{AX}$  и  $\dot{E}_{ax}$ , эквивалентное совпадению стрелок часов на циферблате, обозначается группой 0 (а не 12). Кроме того, следует помнить, что за положительное направление вращения векторов ЭДС принято их вращение против часовой стрелки.

Таким образом, в однофазном трансформаторе возможны лишь две группы соединения: группа 0, соответствующая совпадению по фазе  $\dot{E}_{AX}$  и  $\dot{E}_{ax}$ , и группа 6, соответствующая сдвигу фаз между  $\dot{E}_{AX}$  и  $\dot{E}_{ax}$  на  $180^\circ$ . Из этих групп ГОСТ предусматривает лишь группу 0, она обозначается I/I—0.

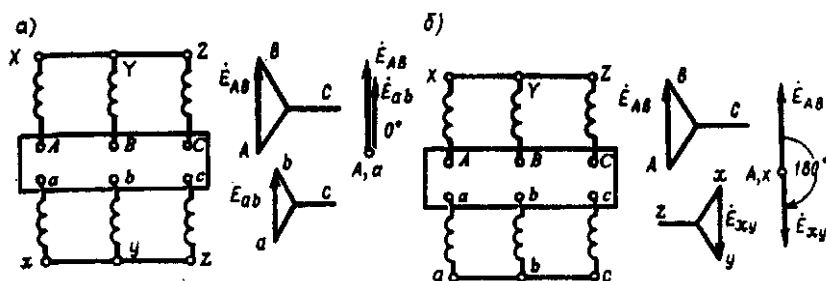


Рис. 6.3. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы: а — для группы  $\Delta/\Delta—0$ ; б — для группы  $Y/Y—6$

Применением разных способов соединения обмоток в трехфазных трансформаторах можно создать 12 различных групп соединения. Рассмотрим в качестве примера схему соединений «звезда—звезда» (рис. 6.3, а). Векторные диаграммы ЭДС показывают, что сдвиг между линейными ЭДС  $\dot{E}_{AB}$  и  $\dot{E}_{ab}$  в данном случае равен нулю. В этом можно убедиться, совместив точки А и а при наложении векторных диаграмм ЭДС обмоток ВН и НН. Следовательно, при указанных схемах соединения обмоток имеет место группа 0; обозначается  $Y/Y—0$ . Если же на стороне НН в нулевую точку соединить зажимы а, b и с, а снимать ЭДС с зажимов x, y и z, то ЭДС  $\dot{E}_{ab}$  изменит фазу на  $180^\circ$  и трансформатор будет принадлежать группе 6 ( $Y/Y—6$ ) (рис.6.3,б).

При соединении обмоток «звезда—треугольник», п, имеет место группа 11 ( $Y/\Delta—11$ ). Если же поменять местами начала и концы фазных обмоток НН, то вектор  $\dot{E}_{ab}$  повернется на  $180^\circ$  и трансформатор будет относиться к группе 5 ( $Y/\Delta—5$ ) (рис. 6.4, б).

При одинаковых схемах соединения обмоток ВН и НН, например  $Y/Y$  и  $\Delta/\Delta$ , получают четные группы соединения, а при 62 неодинаковых схемах, например  $Y/\Delta$  или  $\Delta/Y$ , — нечетные.

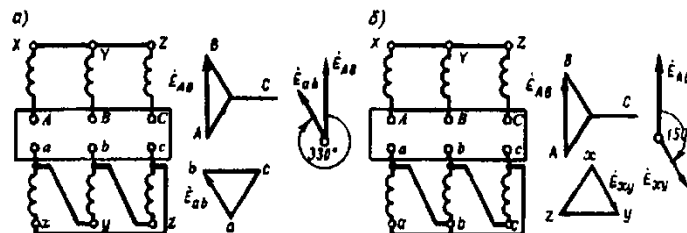


Рис. 6.4. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы: *а* — для группы Y/Д—11; *б* — для группы Y/Д—5.

Рассмотренные четыре группы соединения (0, 6, 11 и 5) называют *основными*. Из каждой основной группы соединения методом круговой перемаркировки выводов на одной стороне трансформатора, например на стороне НН (без изменения схемы соединения), можно получить по две производные группы. Например, если в трансформаторе с группой соединения Y/Y—0 выводы обмотки НН перемаркировать и вместо последовательности *abc* принять последовательность *cab*, то вектор ЭДС  $\dot{E}_{ab}$  повернется на  $120^\circ$ , при этом получим группу соединения Y/Y—4. Если же выводы обмоток НН перемаркировать в последовательность *bca*, то вектор  $\dot{E}_{ab}$  повернется еще на  $120^\circ$ , а всего на  $240^\circ$ ; получим группу Y/Y—8.

Аналогично от основной группы 6 путем круговой перемаркировки получают производные группы 10 и 2, от основной группы I/I — производные группы 3 и 7, от основной группы 5 — производные группы 9 и 1.

Основные группы соединения имеют некоторое преимущество перед производными, так как предусматривают одноименную маркировку выводов обмоток, расположенных на одном стержне. Это уменьшает вероятность ошибочных присоединений. Однако не все группы соединения имеют практическое применение в трехфазных трансформаторах. ГОСТ определяет схемы и группы соединения, применяемые для силовых двухобмоточных трансформаторов общепромышленного назначения (рис. 6.5).

| Схемы соединения обмоток |    | Диаграммы векторов ЭДС |    | Условные обозначения |
|--------------------------|----|------------------------|----|----------------------|
| ВН                       | НН | ВН                     | НН |                      |
|                          |    |                        |    |                      |
|                          |    |                        |    |                      |
|                          |    |                        |    |                      |
|                          |    |                        |    |                      |
|                          |    |                        |    |                      |

Рисунок 6.5. Схемы и группы соединения обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов.

Соединяя обмотки НН в зигзаг в сочетании с соединением обмотки ВН в звезду или треугольник, можно получить практически любой угол сдвига фаз между ЭДС обмоток ВН и НН. Этого достигают разделением обмотки НН на две части с различным соотношением витков в этих частях.

При изготовлении или в процессе эксплуатации трансформаторов иногда возникает необходимость в опытной проверке группы соединения. Существует несколько методов такой проверки, но наиболее распространены методы фазометра и вольтметра.

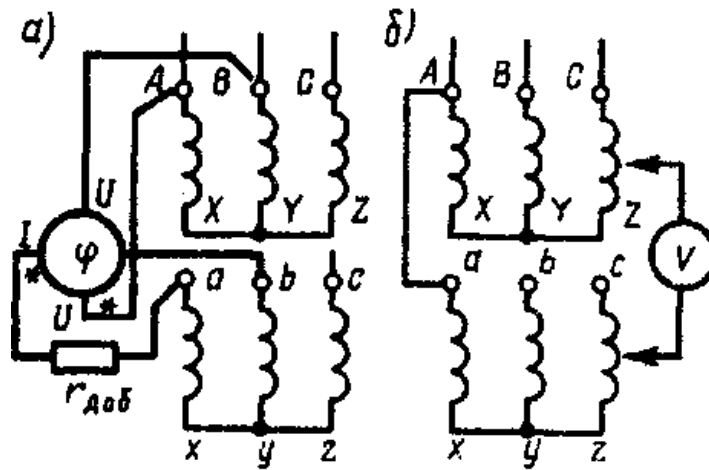


Рис. 6.6. Проверка группы соединения Y/Y—0 методами фазометра (а) и вольтметра (б).

**Метод фазометра.** Основан на непосредственном измерении угла фазового сдвига между соответствующими линейными напряжениями (ЭДС) обмоток ВН и НН с помощью фазометра  $\varphi$ , включенного по схеме, показанной на рис. 6.6, а. Параллельную обмотку фазометра  $U-U$  подключают к стороне ВН, а последовательную обмотку  $1-1$  — к стороне НН. Для ограничения тока в последовательной обмотке ее подключают через добавочное сопротивление  $r_{доб.}$ . Затем трансформатор включают в сеть с симметричным трехфазным напряжением. Для удобства измерений желательно, чтобы фазометр имел полную ( $360^\circ$ ) шкалу.

**Метод вольтметра.** Непосредственного измерения угла фазового сдвига между линейными напряжениями (ЭДС) этот метод не дает. Это *косвенный* метод и основан на измерении вольтметром напряжений (ЭДС) между одноименными выводами обмоток ВН и НН. Если проверяют группу соединения Y/Y—О (рис. 6.6, б), то, соединив проводом выводы  $A$  и  $a$ , измеряют напряжение  $U_{b-B}$  (между выводами  $b$  и  $B$ ) и  $U_{c-C}$  (между выводами  $c$  и  $C$ ). Если предполагаемая группа соединения Y/Y—0 соответствует фактической, то напряжение ( $B$ )

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{ab}(k_L - 1), \quad (2.1)$$

где  $k_L = U_{AB}/U_{ab}$  — отношение линейных напряжений (ЭДС) ВН и НН, т. е. коэффициент трансформации линейных напряжений (ЭДС),

Если проверяют группы соединения 6, 11 или 5, то для проверки измеренных значений напряжений пользуются формулами:

группа Y/Y—6

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{xy}(k_L + 1);$$

группа Y/Δ — 11

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{ab}(1 - \sqrt{3}k_L + k_L^2);$$

группа Y/Δ — 5

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{ab} (1 + \sqrt{3}k_L + k_L^2)$$

Здесь  $U_{ab}$  и  $U_{xy}$  — линейные напряжения на выводах обмоток НН, В.

Если условия равенства напряжений по приводимым формулам не соблюдаются, то это свидетельствует о нарушениях в маркировке выводов трансформатора.

#### **Указание по технике безопасности:**

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты. По одному из однофазных трансформаторов трехфазных трансформаторных групп А2, А7 включаются на параллельную работу на активную нагрузку А10. С помощью мультиметров блока Р1 контролируется токи нагрузки параллельно включенных трансформаторов

#### **Указания по проведению эксперимента**

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.



- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1.

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

- Переключателями номинальных напряжений блоков А2 и А7 установите коэффициенты трансформации трансформаторов, например, равными соответственно 230/230В и 230/220 В.

- Установите переключателями активную нагрузку в фазах блока А10, например, равной 30 %.

- Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров Р1.

- Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.

- Включите источник G1.

- С помощью амперметров Р1.1 и Р1.2 измерьте токи  $I_1$  и  $I_2$  нагрузки параллельно включенных однофазных трансформаторов.

- Отключите источник G1.

- Уравнительный ток, вызванный неравенством коэффициентов трансформации параллельно включенных однофазных трансформаторов, определяйте по формуле

$$I_y = |(I_{11} - I_{12}) / 2|.$$

Электрическая схема соединений представлена на рис. 7.1.

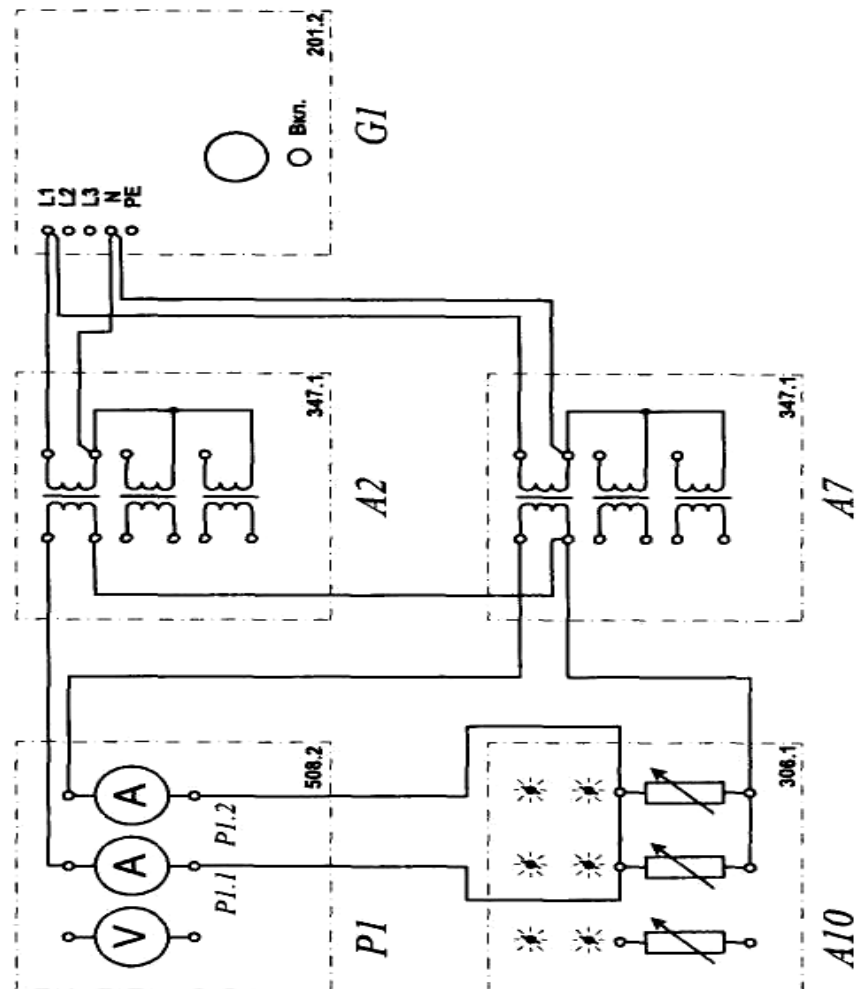


Рисунок 6.6- Схема соединения

*Подтверждение недопустимости параллельной работы трехфазных трансформаторов с различными группами соединений обмоток*

### Описание электрической схемы соединений

Источник G1 – источник синусоидального напряжения промышленной части. Обмотки трехфазных трансформаторных групп A2 и A7 (трёхфазных трансформаторов) Соединены соответственно по схеме Y/Y и Y/Δ. С помощью мультиметров блока P1 контролируется напряжения между одноименными фазами трехфазных трансформаторов.

Опыт выполняется по схеме рис. 8.3.

### Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания G1.

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- В трехфазных трансформаторных группах А2 и А7 переключателями установите желаемые номинальные вторичные напряжения трансформаторов, например, 127 и 230 В.
- Включите источник G1.
- Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
- С помощью вольтметров P1.1 и P1.2 измерьте напряжения  $U_1$  и  $U_2$ .
- Отключите источник G1.
- Рассчитайте ожидаемую кратность уравнивающего тока  $I_y$  (по отношению к номинальному току трансформаторов  $I_H$ ) при включении на параллельную работу испытуемых трехфазных трансформаторов с данными группами соединения обмоток по формуле

$$I_y / I_H = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot 100 / (2 \cdot 230 \cdot U_K),$$

где  $U_K$  - напряжение короткого замыкания трансформаторов, %.

- По ожидаемой величине кратности уравнивающего тока сделайте вывод о недопустимости параллельной работы трансформаторов с различными группами соединения обмоток.

Опыт выполняется по схеме рис. 6.7.

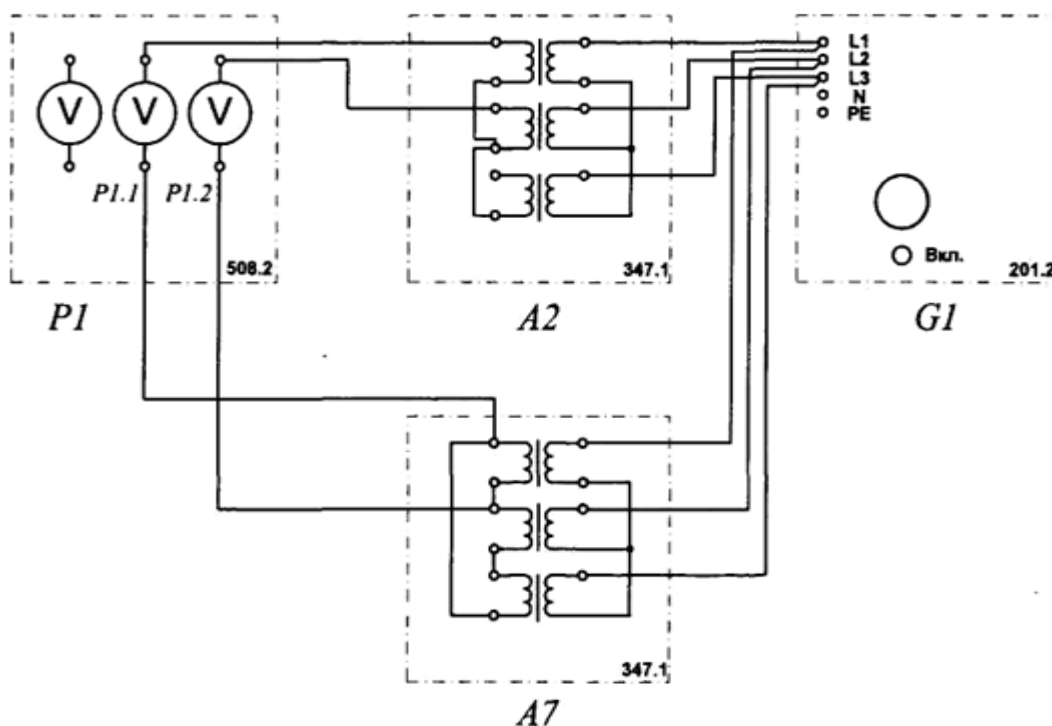


Рис. 6.7. Электрическая схема соединений

**Контрольные вопросы**



1. С какой целью применяют параллельную работу трансформаторов?
2. Каковы условия включения трансформаторов на параллельную работу?
3. Почему не допускается включение на параллельную работу трансформаторов с разными группами соединения, даже при одинаковых вторичных напряжениях?
4. Каковы допуски на различие коэффициентов трансформации и напряжений к.з. для трансформаторов, включаемых на параллельную работу?
5. Какие преимущества у схемы электропитания, состоящей из параллельно работающих трансформаторов?
6. Назовите условия параллельной работы трехфазных трансформаторов и приведите их обоснование.

**Лабораторная работа № 7. Генераторы постоянного тока с параллельным и смешанным возбуждением. Возбуждение самовозбуждения генератора постоянного тока с регистрацией и отображением режимных параметров на компьютере. Регистрация и отображение на компьютере тока короткого замыкания генератора постоянного тока с параллельным возбуждением.**

**Цель работы:** Провести эксперимент возбуждения самовозбуждения генератора постоянного тока с регистрацией и отображением режимных параметров на компьютере. Регистрация и отображение на компьютере тока короткого замыкания генератора постоянного тока с параллельным возбуждением .

**Основы теории:**

Генератор постоянного тока (ГПТ) состоит из тех же элементов, что и ДПТ (рис 7.1).

Назначением обмотки возбуждения является создание постоянного магнитного поля в зазоре между статором и якорем. Якорь ГПТ приводится во вращение сторонним двигателем, например, дизелем.

*Принцип действия ГПТ* состоит в следующем: в проводниках якоря, перемещающихся (вращающихся) в магнитном поле обмотки возбуждения  $\Phi_{ОВ}$  наводится э.д.с.  $E$ . Направление э.д.с.  $E$  определяется правилом правой руки. Э.д.с.  $E$  снимается со щеток и выводится на клеммы генератора.

Если к клеммам ГПТ подключить нагрузку  $R_H$ , замкнув ключ  $SA$ , то в нагрузке потечет ток якоря  $I_A$ , которым будет создано на сопротивлении нагрузки  $R_H$  напряжение  $U_A$ . Направление тока  $I_A$  совпадает с направлением э.д.с.  $E$ .

Уравнение цепи якоря, оставленное по 2-му закону Кирхгофа, имеет вид:

$$E = U_B + R_B I_B \quad \Rightarrow \quad U_B = E - R_B I_B \quad \Rightarrow \quad U_B = c\phi\omega - R_B I_B$$

Уравнения ГПТ и ДПТ одинаковые по структуре и отличаются только знаком тока  $I_A$ .

Помимо основного эффекта – получения э.д.с.  $E$ , в ГПТ существует *побочный эффект* – возникновение тормозящего момента  $M_T$ , направлено навстречу моменту  $M_{диз}$  дизеля. Тормозящий момент  $M_T$  возникает за счет взаимодействия проводников обмотки якоря, обтекаемых током  $I_A$  нагруженного генератора, и магнитного поля обмотки возбуждения  $\Phi_{ОВ}$ . Направление момента  $M_T$  определенное по правилу левой руки, будет противоположным направлению момента  $M_{диз}$ , и если  $M_{диз}$  заставляет якорь вращаться с частотой  $\omega$ , то момент  $M_T$  будет направлен навстречу вращению. Величина тормозного момента  $M_T$  прямо пропорциональна коэффициенту магнитного потока  $c\phi$  ГПТ и току якоря  $I_A$ :

$$M_T = c\phi I_B$$

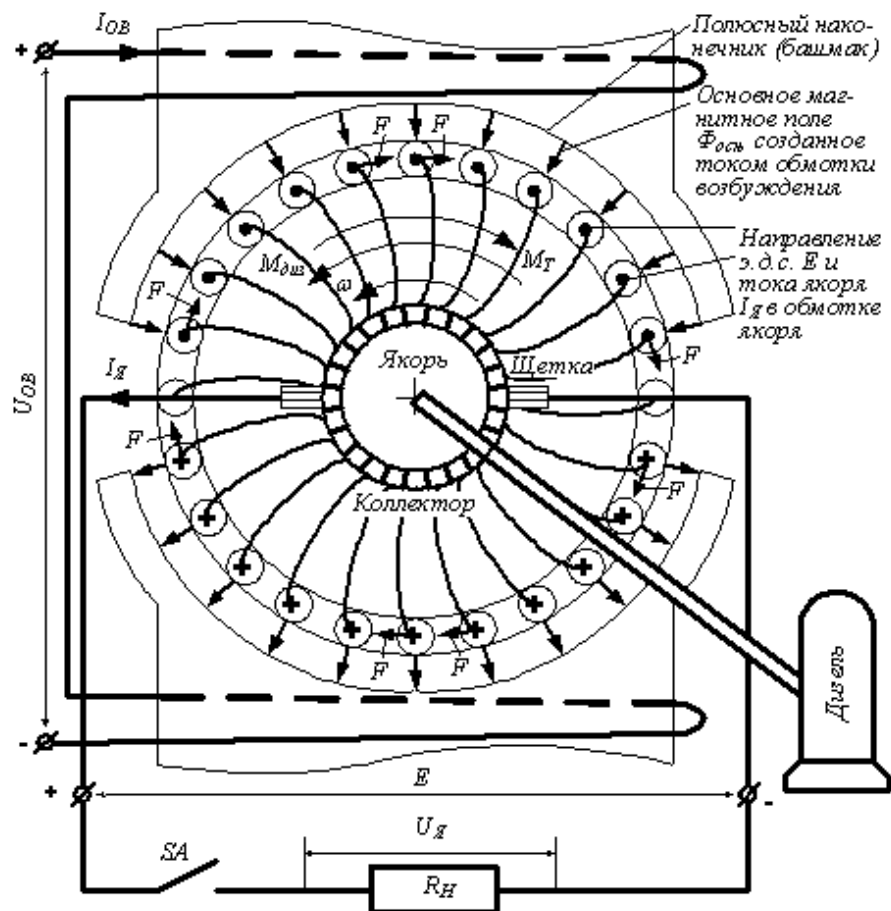


Рисунок 7.1- Устройство и принцип действия генератора постоянного тока

Дизель развивает момент  $M_{диз}$  за счет сжигания в нем топлива, что является расходом тепловой энергии  $W_T$ . ГПТ вращается с постоянной частотой  $\omega$  благодаря тому, что дизелем постоянно поддерживается равенство моментов:  $M_{диз} = M_T$ . Возникновение момента  $M_T$  связано с током  $I_A$ . Этим током в сопротивлении  $R_H$  выделяется электрическая энергия  $W_Y = R_H I_A^2 t$ . Энергия  $W_Y$  может быть взята только из тепловой  $W_T$ . Если якорь ГПТ приводится во вращение водяной турбиной падающим на нее потоком воды, то для вращения ГПТ расходуется механическая энергия. Значит, в ГПТ происходит преобразование энергии другого вида от устройства, способного вращать якорь ГПТ.

#### **Указание по технике безопасности:**

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

### **Описание электрических схем соединений**

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока G4, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением. (рис 7.2(а); 7.2(б); 7,3)

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока M1, работающей в режиме синхронного двигателя.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения РЗ электромашинного агрегата.

Машина (синхронный двигатель) М1 получает питание от источника G1 через трехфазную трансформаторную группу А2 и выключатель А6.

Реостат А9 выполняет роль резистора синхронизации и подключается выключателем А8 к обмотке возбуждения синхронного двигателя М1 на этапе пуска последнего.

Реостат А11 служит для изменения сопротивления в цепи возбуждения генератора G4.

Датчики тока и напряжения в блоке А12 обеспечивают гальваническую развязку силовой и измерительной цепей и преобразуют ток возбуждения и э.д.с. испытуемого генератора G4 в пропорциональные им нормированные напряжения.

Через аналоговые входы АСН0-АСН8 и АСН1-АСН9 коннектора А4 напряжения, пропорциональные току возбуждения и э.д.с. испытуемого генератора G4 вводятся в компьютер А5.

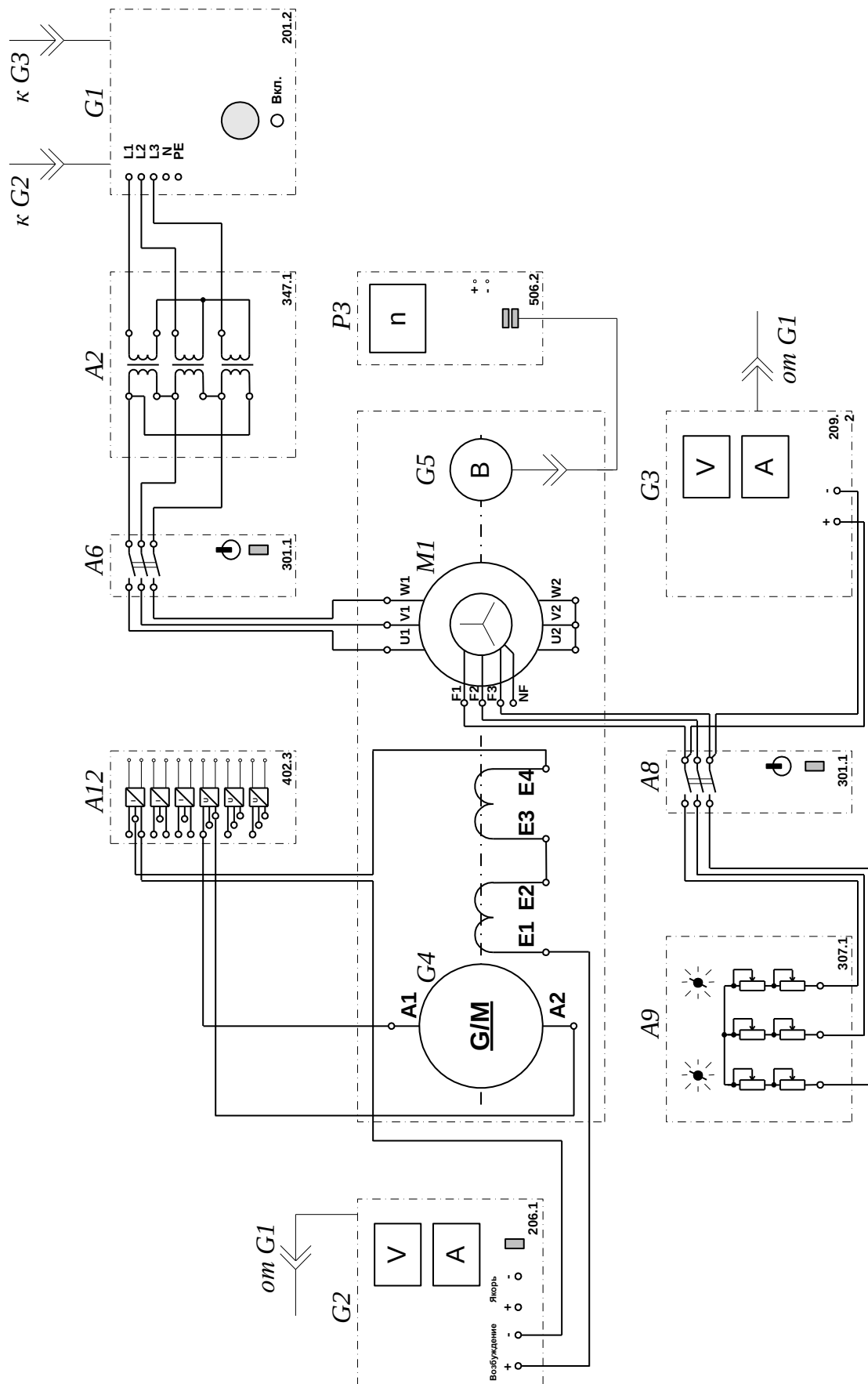


Рисунок 7.2(а) Электрическая схема соединений (вариант 1)

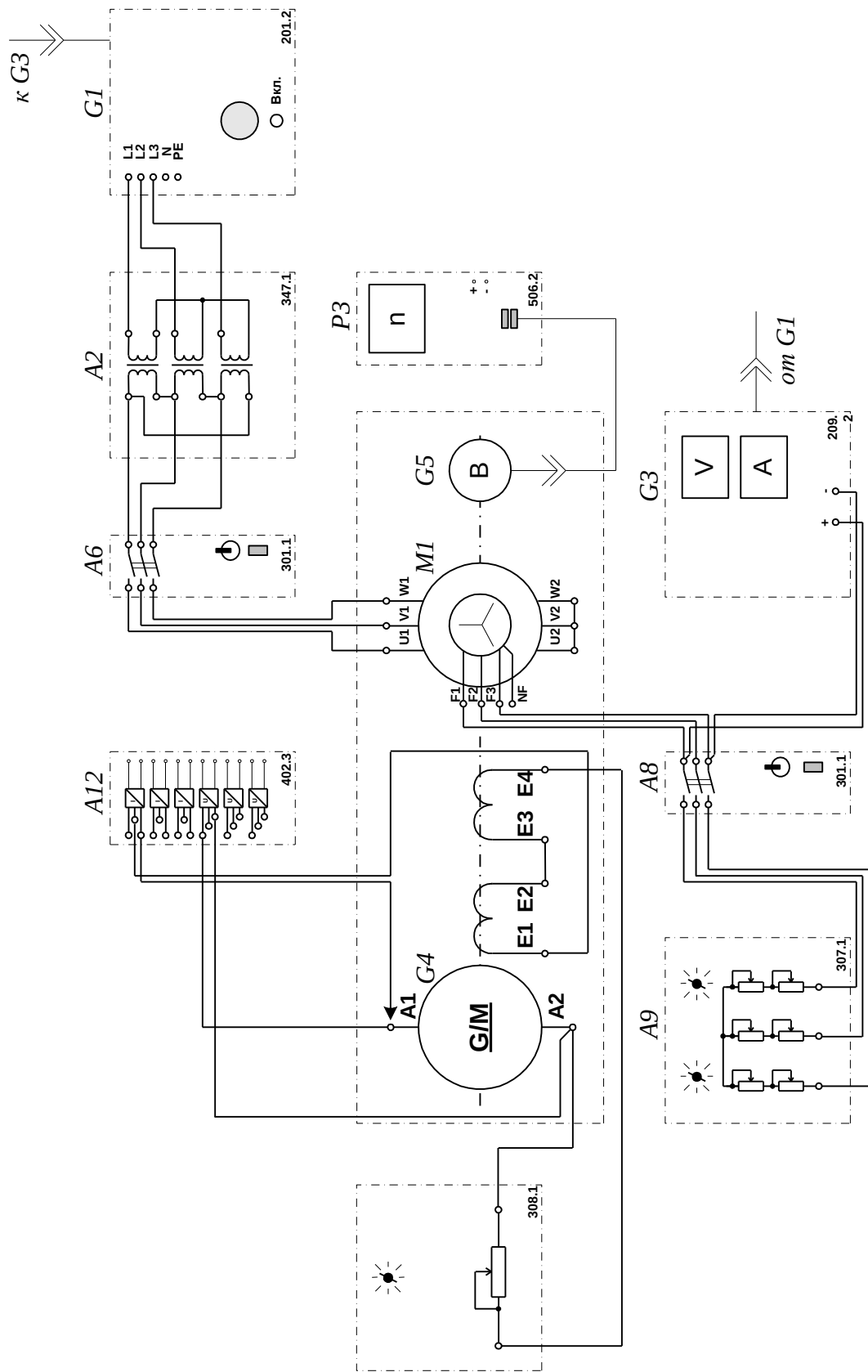


Рисунок 7.2(б)- Электрическая схема соединений (вариант 2)

## Электрическая схема соединений (продолжение)

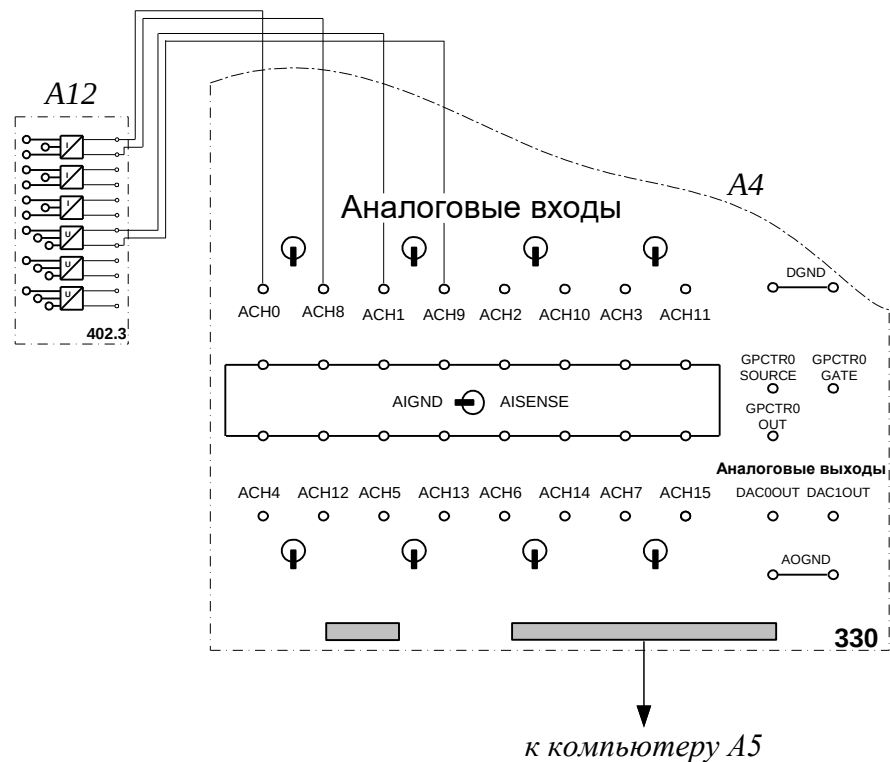


Рисунок 7.3- Электрическая схема соединений (продолжение)

## Указания по проведению эксперимента

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (Приложение Б).

Соедините гнезда защитного заземления " $\oplus$ " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1.

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (**вариант 1** при возбуждении генератора G4 от независимого источника G2 / **вариант 2** при самовозбуждении генератора G4).

Переключатели режима работы источника G2, возбудителя G3 и выключателей A6 и A8 установите в положение «РУЧН.».

Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.

В трехфазной трансформаторной группе A2 установите номинальное напряжение вторичных обмоток трансформаторов равным 230 В.

Установите в каждой фазе реостата А3 суммарное сопротивление 8 Ом.

Включите выключатель «СЕТЬ» выключателей А6, А8, указателя частоты вращения Р3 и блока А12 датчиков тока и напряжения.

Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А5 и запустите прикладную программу “Многоканальный осциллограф”. Настройте программу для запоминания, например, последних 5 секунд процесса.

Включите выключатель А8 кнопкой «ВКЛ».

Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

Включите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите на его выходе напряжение равное 20 В.

Включите выключатель А6 кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель М1 должен начать вращаться и стрелка указателя Р3 должна отклониться вправо.

Нажмите кнопку «ВКЛ.» возбудителя G3. Двигатель М1 при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью.

Отключите выключатель А8 кнопкой «ОТКЛ».

Нажмите кнопки «ВКЛ» включения сканирования первого и второго каналов виртуального осциллографа.

При возбуждении генератора G4 от независимого источника G2 (**вариант 1 электрической схемы соединений**) включите у него выключатель «СЕТЬ», нажмите кнопку «ВКЛ.» и через 3с остановите сканирование данных программой «Многоканальный осциллограф» нажатием на виртуальную кнопку «Остановить».

При самовозбуждении генератора G4 (**вариант 2 электрической схемы соединений**) замкните проводником его цепь возбуждения и через 3с остановите сканирование данных программой «Многоканальный осциллограф» нажатием на виртуальную кнопку «Остановить».

У источника G2 нажмите кнопку «ОТКЛ.» и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите выключатель А6 нажатием кнопки «ОТКЛ.». Отключите источник G1 нажатием на кнопку – гриб, и последующим отключением ключа – выключателя. Отключите выключатель "СЕТЬ" возбудителя G3, выключателей А6 и А8, указателя частоты вращения Р3 и блока А12 датчиков тока и напряжения.

Используя возможности программы “Многоканальный осциллограф”, проанализируйте полученные временные зависимости тока возбуждения и э.д.с. генератора постоянного тока при его возбуждении / самовозбуждении.



### Описание электрических схем соединений

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.(рис 7.4;7.5)

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока M1, работающей в режиме синхронного двигателя.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Машина (синхронный двигатель) M1 получает питание от источника G1 через трехфазную трансформаторную группу A2 и выключатель A6.

Реостат A9 выполняет роль резистора синхронизации и подключается выключателем A8 к обмотке возбуждения синхронного двигателя M1 на этапе пуска последнего.

Датчик тока в блоке A12 обеспечивает гальваническую развязку силовой и измерительной цепей и преобразует ток короткого замыкания испытуемого генератора G4 в пропорциональное ему нормированное напряжение.

Через аналоговые входы АСН0-АСН8 коннектора A4 напряжение, пропорциональное току короткого замыкания испытуемого генератора G4 вводится в компьютер A5.

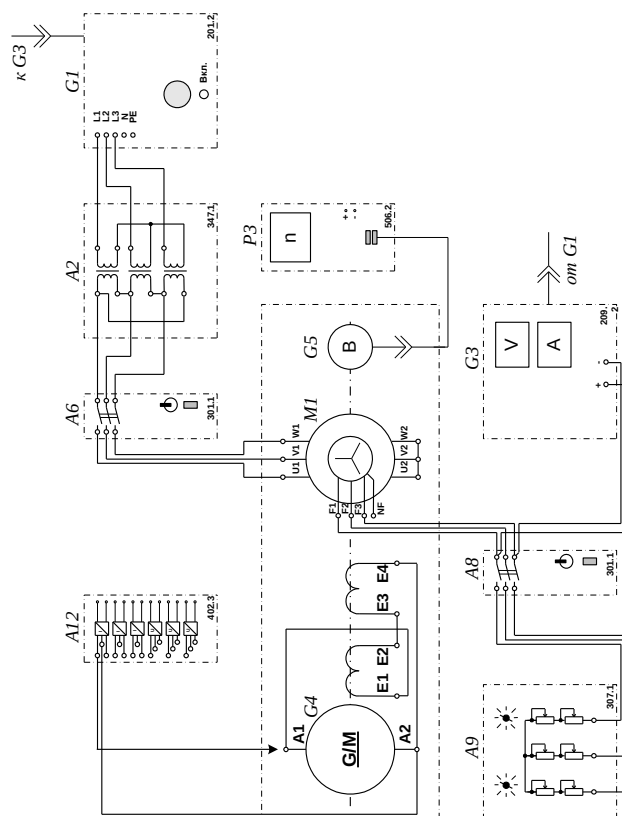


Рисунок 7.4 Электрическая схема соединений

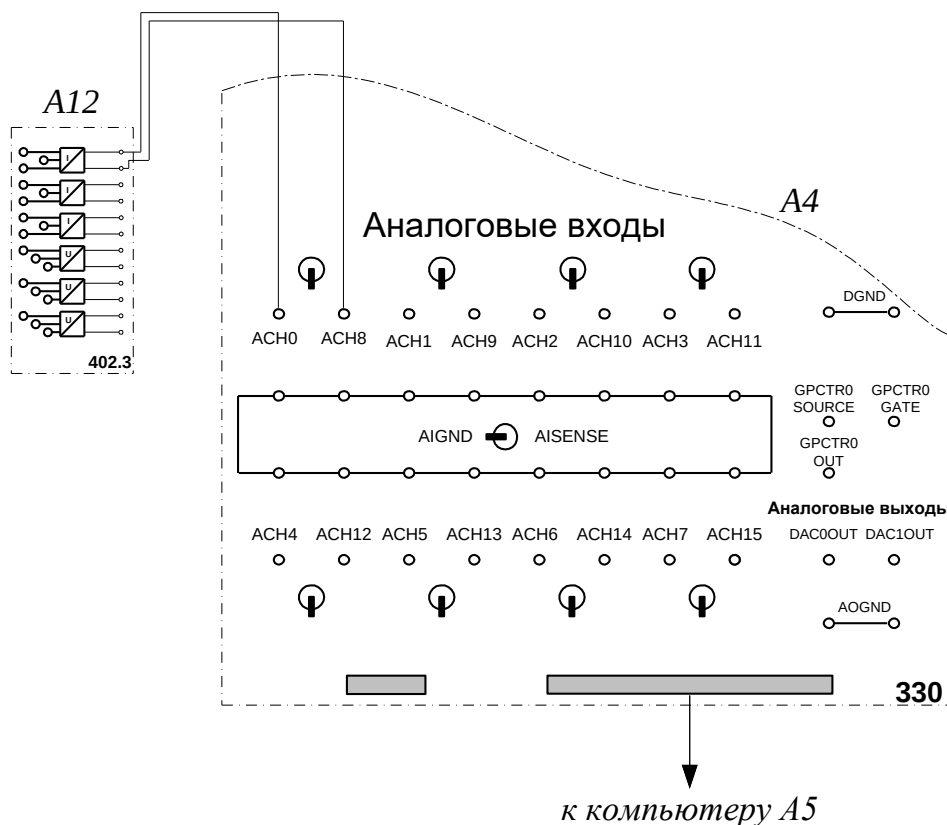


Рисунок 7.5 Электрическая схема соединений (продолжение)

### Указания по проведению эксперимента

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (Приложение Б).

Соедините гнезда защитного заземления " $\oplus$ " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

Переключатели режима работы возбудителя G3 и выключателей A6 и A8 установите в положение «РУЧН.».

Регулировочную рукоятку возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.

В трехфазной трансформаторной группе A2 установите номинальное напряжение вторичных обмоток трансформаторов равным 230 В.

Установите в каждой фазе реостата A3 суммарное сопротивление 8 Ом.

Включите выключатель «СЕТЬ» выключателей A6, A8, указателя частоты вращения P3 и блока A12 датчиков тока и напряжения.

Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А5 и запустите прикладную программу “Многоканальный осциллограф”. Настройте программу для запоминания, например, последних 5 секунд процесса.

Включите выключатель А8 кнопкой «ВКЛ».

Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

Включите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3 и, вращая его регулировочную ручку, установите на его выходе напряжение, равное 20 В.

Включите выключатель А6 кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель М1 должен начать вращаться и стрелка указателя Р3 должна отклониться вправо.

Нажмите кнопку «ВКЛ.» возбудителя G3. Двигатель М1 при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью.

Отключите выключатель А8 кнопкой «ОТКЛ».

Нажмите кнопку «ВКЛ» включения сканирования первого канала виртуального осциллографа.

Закоротите проводником якорную обмотку генератора G4 и через 3с остановите сканирование данных программой «Многоканальный осциллограф» нажатием на виртуальную кнопку «Остановить».

Отключите выключатель А6 нажатием кнопки «ОТКЛ.». Отключите источник G1 нажатием на кнопку – гриб, и последующим отключением ключа – выключателя. Отключите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3, выключателей А6 и А8, указателя частоты вращения Р3 и блока А12 датчиков тока и напряжения.

Используя возможности программы “Многоканальный осциллограф”, проанализируйте полученную временную зависимость тока короткого замыкания генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните принцип действия ГПТ и вид уравнения электрического состояния его якорной цепи.
2. Какой побочный эффект возникает в нагруженном ГПТ?
3. Поясните физику преобразования энергии сторонних механизмов, вращающих якорь ГПТ, в энергию электрическую.

**Лабораторная работа № 8. Характеристика двигателей постоянного тока и их управление. Снятие характеристики холостого хода  $E_0=f(I_f)$  генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Снятие характеристики короткого замыкания  $I_K=f(I_f)$  генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Снятие внешней  $U=f(I)$ , регулировочной  $I_f=f(I)$  и нагрузочной  $U=f(I_f)$  характеристик генератора постоянного тока с независимым/параллельным возбуждением.**

**Цель работы:** Определить характеристики холостого хода  $E_0=f(I_f)$  генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Определить характеристики короткого замыкания  $I_K=f(I_f)$  генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Определить внешней  $U=f(I)$ , регулировочной  $I_f=f(I)$  и нагрузочной  $U=f(I_f)$  характеристик генератора постоянного тока с независимым / параллельным возбуждением

**Основы теории:**

Свойства генераторов постоянного тока обусловлены в основном способом питания обмотки возбуждения. В зависимости от этого различают следующие типы генераторов:

- 1) с независимым возбуждением - обмотка возбуждения получает питание от постороннего источника постоянного тока;
- 2) с параллельным возбуждением - обмотка возбуждения подключена к обмотке якоря параллельно с нагрузкой;
- 3) с последовательным возбуждением - обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря и нагрузкой;
- 4) со смешанным возбуждением - имеются две обмотки возбуждения: одна подключена параллельно нагрузке, а другая - последовательно с ней.

Генераторы рассматриваемых типов имеют одинаковое устройство и отличаются лишь выполнением обмотки возбуждения. Обмотки независимого и параллельного возбуждения, имеющие большое число витков, изготавливают из провода малого сечения; обмотку последовательного возбуждения, имеющую небольшое число витков, - из провода большого сечения. Генераторы малой мощности иногда выполняют с постоянными магнитами. Свойства таких генераторов близки к свойствам генераторов с независимым возбуждением.

Основными характеристиками, определяющими свойства генераторов постоянного тока, являются характеристики: холостого хода, внешняя, регулировочная и нагрузочная.

В генераторе с независимым возбуждением ток возбуждения  $I_B$  создается сторонним источником напряжения  $U_B$  и не зависит от тока якоря  $I_A$ . Ток якоря  $I_A$  равен току нагрузки  $I_H$ . Величина тока  $I_B$  определяется только положением регулировочного реостата  $R_{PB}$ , вклю-

ченного в цепь обмотки возбуждения (рис.8.1(а)). Обычно ток возбуждения невелик и составляет 1...3% от номинального тока якоря.

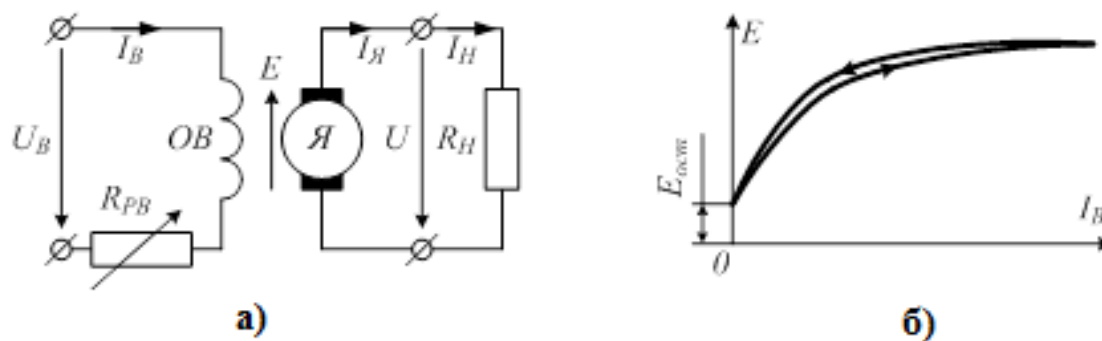


Рисунок 8.1 – Схема ГИТ с независимым возбуждением (а) и характеристика холостого хода генератора

*Характеристикой холостого хода* (рис.8.1(б)) называют зависимость э.д.с.  $E$  от тока возбуждения  $I_B$  для ненагруженного ГПТ ( $I_A=0$ ) при постоянной частоте вращения  $\omega=const$ . При холостом ходе машины, когда цепь нагрузки разомкнута, напряжение  $U$  на зажимах обмотки якоря равно ЭДС  $E=c\Phi\omega$  и зависит только от величины магнитного потока  $\Phi_B$ , т.е. от тока возбуждения  $I_B$ . Поэтому характеристика холостого хода  $E=f(I_B)$  подобна магнитной характеристике  $\Phi_B=f(I_B)$ . Расхождение ветвей  $E=f(I_B)$  объясняется наличием гистерезиса в магнитопроводе машины. Обычно гистерезисом пренебрегают и используют среднюю линию между ветвями гистерезисной кривой. При  $I_B=0$  в обмотке якоря потоком остаточного магнетизма индуцируется остаточная э.д.с.  $E_{ост}$ , которая составляет 2...4% от  $E_{ном}$ .

*Внешней характеристикой* (рис.8.2,а) называют зависимость  $U=f(I_A)$  напряжения  $U$  нагруженного генератора от тока нагрузки  $I_H$ , равного току якоря  $I_A$  при постоянной частоте вращения  $\omega=const$  и постоянном токе возбуждения  $I_B=const$ . В режиме нагрузки напряжение генератора равно

$$U = E(\Phi_{\Sigma}) - R_{\Sigma} I_{\Sigma} = E(I_A, I_B) - R_{\Sigma} I_{\Sigma},$$

где  $E(\Phi_{\Sigma})=E(I_B, I_A)$  – э.д.с. ГПТ, зависящая от суммарного магнитного потока (рис.3.6), состоящего из основного потока  $\Phi_{осн}$  ОВ и потока  $\Phi_{ря}$  реакции якоря, причем каждый из названных потоков зависит, соответственно, от тока возбуждения  $I_B$  и якоря  $I_A$ .

С увеличением нагрузки напряжение  $U$  уменьшается по двум причинам:

- 1) из-за увеличения падения напряжения  $\Delta U_1 = R_A I_A$  на сопротивлении  $R_A$  обмотки якоря;
- 2) из-за уменьшения ЭДС  $E$  в результате размагничивающего действия реакции якоря, что показано как понижение напряжения  $U$  на  $\Delta U_2$ .

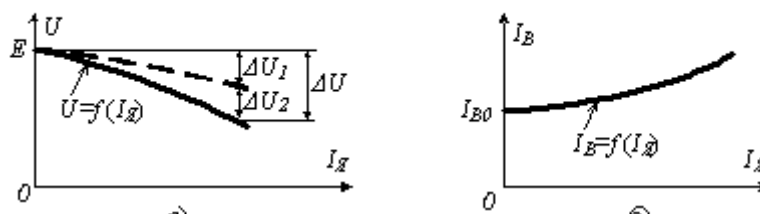


Рисунок 8.2- Внешняя (а) и регулировочная (б) характеристика ГПТ

Изменение напряжения при переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки для генераторов с независимым возбуждением составляет 5...15%.

*Регулировочной характеристикой* (рис.8.2,б) называют зависимость между токами  $I_A$  и  $I_B$ , показывающая то, каким образом следует регулировать ток возбуждения  $I_B$ , чтобы поддерживать постоянным напряжение  $U$  генератора при изменении тока нагрузки  $I_A$ . Очевидно, что в случае падающей внешней характеристики (8.2,а) по мере роста нагрузки нужно увеличивать э.д.с.  $E$ , что, в свою очередь, в соответствии с пропорциональной зависимостью между э.д.с. и током возбуждения (рис.8.1(б)), нужно увеличивать ток возбуждения  $I_B$ .

В генераторе с параллельным возбуждением ток возбуждения  $I_B$  создается э.д.с.  $E$ , индуцируемой в якоре генератора (рис.8.3,а). Обычно ток возбуждения  $I_B$  невелик и составляет 1...3% от номинального тока якоря. Поэтому, ток нагрузки  $I_H$  можно считать равным току якоря  $I_A$ . В цепь обмотки возбуждения может быть включен регулировочный реостат возбуждения  $R_{PB}$ , с помощью которого устанавливают величину э.д.с.  $E_0$  холостого ГПТ.

Э.д.с.  $E_0$  на выходе ГПТ образуется в процессе его самовозбуждения (рис.8.3,б) при отключенной электрической нагрузке – на холостом ходу. На рисунке показаны график 1 холостого хода ГПТ, который будет таким же, как и ГПТ с независимым возбуждением, и график 2, связывающий между собой напряжение  $U$  и ток  $I_B$  ОВ зависимостью

$$I_B = \frac{U}{R_{OB} + R_{PB}} = \frac{E_0}{R_{OB} + R_{PB}}$$

В режиме холостого хода, при котором происходит самовозбуждение, напряжение  $U$  равно э.д.с.  $E_0$  холостого хода ГПТ.

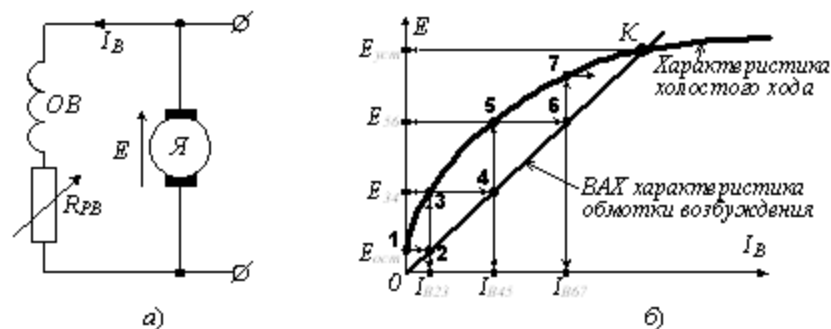


Рисунок 8.3- Схема ГПТ с параллельным возбуждением (а) и процесс самовозбуждения

Процесс самовозбуждения ГПТ с параллельным возбуждением состоит из следующих стадий:

1). Точка 1 – начало процесса. На клеммах ГПТ индуктируется остаточная э.д.с.  $E_{ост}$ . Остаточная э.д.с., приложенная к обмотке возбуждения, создает в ней ток  $I_{В23}$ , величиной

$$I_{В23} = \frac{E_{ост}}{R_{ОВ} + R_{РВ}}.$$

3). Током  $I_{В23}$  в обмотке возбуждения создается магнитное поле, которое будучи направленным согласно с  $\Phi_{ост}$ , создаст э.д.с.  $E_{34}$ , определяемую точкой 2.

4). Э.д.с.  $E_{34}$ , приложенная к обмотке возбуждения, создает в ней ток  $I_{В45}$

$$I_{В45} = \frac{E_{34}}{R_{ОВ} + R_{РВ}}$$

5). Током  $I_{В45}$  в обмотке возбуждения создается магнитное поле, которое будучи направленным согласно с  $\Phi_{ост}$ , создаст э.д.с.  $E_{34}$ , определяемую точкой 5.

Описанные процессы будут повторяться до тех пор, пока будет достигнута точка К пересечения графиков холостого хода ГПТ и вольтамперной характеристики ОВ (3.35). На клеммах ГПТ установится э.д.с.  $E_{уст}$  (далее – просто  $E$ ).

Очевидно, что положение точки К зависит от наклона характеристик графика цепи ОВ. Чем больше сопротивление регулировочного реостата возбуждения  $R_{РВ}$ , тем круче будет подъем графика цепи ОВ, тем ниже будет располагаться точка пересечения К и тем меньше будет значение э.д.с.  $E$ .

Учитывая изложенное, можно сформулировать три условия самовозбуждения ГПТ с параллельным возбуждением:

- 1) должна быть остаточная намагниченность  $\Phi_{ост}$  стали магнитопровода;
- 2) должно быть согласно с  $\Phi_{ост}$  включение ОВ по создаваемому ею магнитному потоку;

3) должно быть не слишком большим собственное сопротивление  $R_{ОВ}$  обмотки возбуждения, чтобы при самовозбуждении без сопротивления  $R_{РВ}$  э.д.с.  $E$  было бы не меньше номинального  $E_{ном}$ .

Внешняя характеристика ГПТ имеет вид, представленный на рис 8.4. На ней помимо составляющих  $\Delta U_1$  и  $\Delta U_2$  падения напряжения  $\Delta U$  ГПТ, имеется третья составляющая  $\Delta U_3$ , обусловленная тем, что из-за снижения напряжения  $U$  понижается напряжение на обмотке возбуждения, снижается ток  $I_B$  возбуждения и снижается э.д.с.  $E$ .

Если замкнуть накоротко клеммы ГПТ с параллельным возбуждением, то исчезнет напряжение на ОВ, исчезнет ток возбуждения и магнитный поток возбуждения и останутся только остаточный поток  $\Phi_{ост}$  и остаточная э.д.с.  $E_{ост}$ . Ввиду малости  $E_{ост}$ , которая составляет 2...4% от  $E_{ном}$ , ток короткого замыкания  $I_{я.кз}$  будет не выше номинального тока ГПТ. Значит для ГПТ с параллельным возбуждением не опасен режим короткого замыкания.

В генераторе со смешанным (*компаундным*) возбуждением поток создается двумя обмотками – шунтовой (ОВШ) и серийной (ОВС) (рис.8.5,а). Применяется только параллельно-последовательное возбуждение с  $\Phi_{ОВ} = \Phi_{Ш} \pm \Phi_C$  с преобладанием магнитного потока  $\Phi_{Ш}$  шунтовой ОВ над магнитным потоком  $\Phi_C$  серийной ОВ.

На рис.8.5,б приведена внешняя характеристика 2, созданная только шунтовой обмоткой возбуждения. Эта характеристика взята с рис.8.5,а.

Для обоснования формы внешней характеристики 4, созданной только серийной обмоткой возбуждения, используем характеристику холостого хода 5, которая имеет такой же вид, как у ГПТ с независимым возбуждением (рис.8.1). Ток нагрузки является током якоря  $I_A$  и одновременно током возбуждения  $I_B$ . При увеличении тока якоря  $I_A$  увеличивается э.д.с.  $E$ , так как с ростом тока увеличивается магнитный поток ОВС, но и одновременно растет падение напряжения  $\Delta U$  на сопротивлении провода ОВС. На участке изменения тока якоря  $I_A$  от нулевого значения до некоторого граничного значения  $I_{ГР}$ , рост э.д.с.  $E$  превышает рост падения напряжения  $\Delta U$  и, поэтому, график 4 возрастающий. После тока  $I_{ГР}$  на характеристике 5 холостого хода начинается участок насыщения, в результате чего э.д.с.  $E$  практически перестаёт расти, а рост  $\Delta U$  продолжается. Поэтому на графике 4 после тока  $I_{ГР}$  имеется ниспадающий участок.

При согласном включении ОВШ и ОВС их магнитные потоки складываются ( $\Phi_{ОВ} = \Phi_{Ш} + \Phi_C$ ) и, соответственно, внешние характеристики 2 и 4 складываются, образуя характеристику 1. Внешняя характеристика имеет ту особенность, что выходное напряжение  $U$  практически неизменно во всем диапазоне изменения тока нагрузки. Такие ГПТ применяются в автономных источниках электроэнергии, состоящими из одного-



единственного генератора.

При встречном включении ОБШ и ОВС их магнитные потоки вычитаются ( $\Phi_{ОВ} = \Phi_{Ш} - \Phi_C$ ) и, соответственно, также вычитаются внешние характеристики 2 и 4, образуя характеристику 3. Внешняя характеристика имеет ту особенность, что при коротком замыкании ГПТ ( $U=0$ ) ток ограничен некоторым допустимым значением  $I_{K3}$ . Такие ГПТ применяются в качестве сварочных, для которых режим короткого замыкания является нормальным, рабочим.

В сетях электроснабжения постоянного тока устанавливается не менее двух ГПТ, что дает следующие преимущества (в сравнении с использованием для электропитания только одного ГПТ):

1). Повышается надежность электроснабжения за счет резервирования при использовании более одного ГПТ.

2). Обеспечивается экономичная работа параллельно работающих ГПТ, в которой нагрузка ГПТ может поддерживаться на уровне, обеспечивающем максимальный к.п.д. Так, если нагрузка двух параллельно работающих ГПТ составляет  $0,35...0,4$ , то при выводе из работы одного ГПТ, оставшийся в работе ГПТ загрузится до  $0,7...0,8$ , при которой к.п.д. генератора максимально.

3). Исключается перегрузка ГПТ. Так, если работающие ГПТ нагружены токами, превышающими номинальные, то можно ввести дополнительно в работу еще один ГПТ, который возьмет на себя часть тока нагрузки, разгрузив от токов другие ГПТ.

Различают параллельную работу ГПТ:

- на сеть бесконечной мощности;
- соизмеримой между собой мощности.

Для параллельной работы используют преимущественно ГПТ с независимым возбуждением.

Для ГПТ, вводимых в параллель, должны быть выполнены ряд условий. Для ГПТ, работающих в параллель, должны быть выполнены условия нагружения.

Параллельная работа ГПТ на сеть бесконечной мощности.

Схема параллельной работы ГПТ с сетью бесконечной мощности приведена на рис.8.6,а.

При введении ГПТ для работы параллельно с сетью с напряжением  $U_C$  должны быть выполнены следующие условия:

1. ГПТ должен быть разгруженным.
2. Полярность напряжения подключаемого генератора должна совпадать с полярностью напряжения на шинах сети.

3. Э.д.с.  $E$  ГПТ должна быть равна напряжению  $U_C$  сети.

При соблюдении указанных условий ГПТ включается с помощью  $SA$  безударно, означающее следующее: ток якоря  $I_A$  ГПТ в момент включения нулевой. Внешняя характеристика 3 подключенного ГПТ совпадает при токе  $I_A=0$  с характеристикой 1 сетевого напряжения постоянного уровня (рис.8.6,б).

Далее нужно нагрузить введенный в работу ГПТ, соблюдая следующие условия нагружения:

1. Ток якоря  $I_A$  ГПТ не должен превышать максимально допустимого.

2. Нагрузочный ток  $I_{АН}$  ГПТ должен быть таким, чтобы ток каждого генератора из группы всех параллельно работающих, был бы прямо пропорционален номинальной мощности генератора.

Для нагружения ГПТ нужно увеличить его напряжение возбуждения. Внешняя характеристика 3 такого ГПТ сместится параллельно вверх в положение 2 (рис.3.30,б). Точкой пересечения графиков 1 и 2 определится ток нагрузки  $I_{АН}$  ГПТ.

#### Параллельная работа ГПТ соизмеримой мощности.

Схема параллельной работы ГПТ соизмеримой мощности приведена на рис.8.7,а. Пусть сначала на нагрузку работал только ГПТ1. Назовем его ведущим генератором и он изначально обеспечивал в сети уровень заданный напряжения  $U_{зад}$ , равный, например номинальному напряжению на нагрузке. Ток ведущего ГПТ1 составлял  $I_{А1Н}$  (рис.8.7,б), который определяется точкой пересечения графиков  $U_{зад}$  и 1. Далее на сеть подключается ГПТ2, который назовем ведомым. Условия включения ГПТ2 такие же, как и при включении его на сеть бесконечной мощности. Два условия нагружения ГПТ2, применяемые в сети бесконечной мощности, должны быть дополнены третьим – напряжение сети должно остаться неизменным, равным  $U_{зад}$ .

Пусть ГПТ2 введен в работу с внешней характеристикой 2. Ток нагрузки  $I_{А2Н}$  ведомого генератора будет нулевым.

Для нагружения ГПТ2 нужно увеличить его ток возбуждения. Внешняя характеристика сместится параллельно в положение 2'. ГПТ2 возьмет на себя ток  $I'_{А2Н}$ , ток  $I'_{А1Н}$  ведущего ГПТ2 уменьшится, так как сумма токов обоих генераторов должна остаться постоянной и равной току  $I_H$ , потребляемому нагрузкой:

$$I_H = I'_{A1H} + I'_{A2H} = const \Rightarrow I'_{A2H} = I_H - I'_{A1H}$$

До нагружения ГПТ2 уравнение ГПТ1 имело вид

$$U_{зад} = E_1 - R_{A1} I_{A1H}$$

После нагружения ГПТ2 уравнение ГПТ1 примет вид

$$U'_{зад} = E_1 - R_{A1} I'_{A1H}$$

Так как ток ГПТ понизился с  $I_{я1H}$  до  $I'_{я1H}$ , то из сопоставления формул (3.37) и (3.38) при  $E_1 = \text{const}$  следует, что напряжение сети  $U$  повысится с  $U_{зад}$  до  $U'_{зад}$ .

Для понижения напряжения сети нужно уменьшить ток возбуждения ведущего ГПТ1. Это снизит его э.д.с.  $E_1$  до такого значения  $E'_1$ , что напряжение сети останется равным  $U_{зад}$ :

$$U_{зад} = E'_1 - R_{\delta 1} I'_{\delta 1f}$$

Это приведет к параллельному смещению внешней характеристики ГПТ1 в положение 1'.

Одновременными регулировками напряжений возбуждения обоих генераторов добиваются того, чтобы токи обоих генераторов, например, одинаковой мощности, были бы одинаковыми

$$I'_{\delta 1f} = I'_{\delta 2f}$$

#### ***Указание по технике безопасности:***

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

#### **Описание электрической схемы соединений**

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты. (рис 8.7)

Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания регулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока G4, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока M1, работающей в режиме синхронного двигателя.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Машина (синхронный двигатель) M1 получает питание от источника G1 через трехфазную трансформаторную группу A2 и выключатель A6.

Реостат A9 выполняет роль резистора синхронизации и подключается выключателем A8 к обмотке возбуждения синхронного двигателя M1 на этапе пуска последнего.

С помощью мультиметров блока P1 контролируются ток возбуждения  $I_f$  и э.д.с.  $E_0$  испытуемого генератора G4.

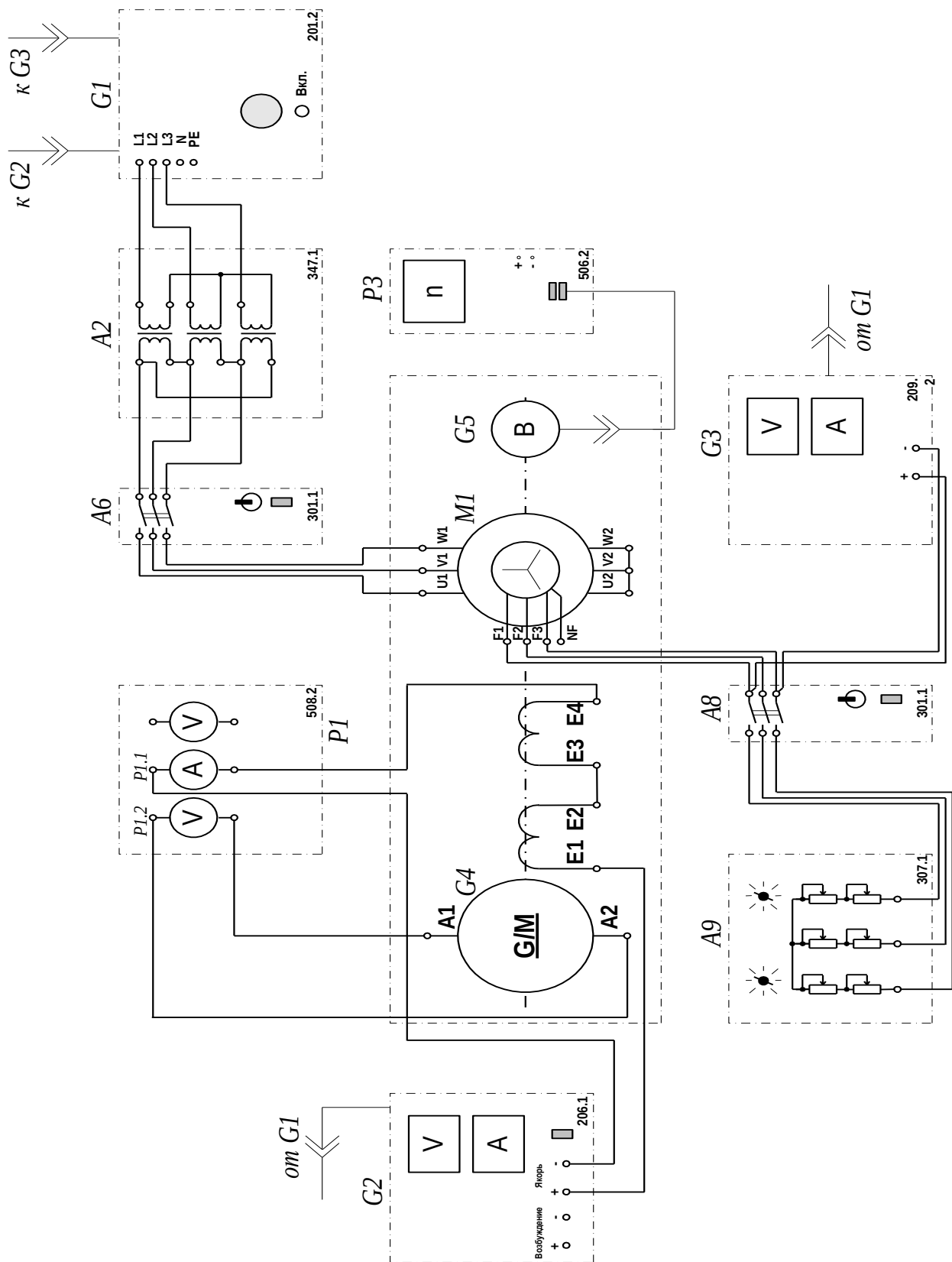


Рисунок 8.7 Электрическая схема соединений

## Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (Приложение Б).
- Соедините гнезда защитного заземления "" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Переключатели режима работы источника G2, возбудителя G3 и выключателей A6 и A8 установите в положение "РУЧН."
- Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- В трехфазной трансформаторной группе A2 установите номинальное напряжение вторичных обмоток трансформаторов равным 230 В.
- Установите в каждой фазе реостата A3 сопротивление 8 Ом.
- Включите выключатель «СЕТЬ» выключателей A6 и A8, блока мультиметров P1, указателя частоты вращения P3.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
- Включите выключатель A8 кнопкой «ВКЛ».
- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите на его выходе напряжение равным 20 В.
- Включите выключатель A6 кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель M1 должен начать вращаться.
- Нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3. Двигатель M1 при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью.
- Отключите выключатель A8 кнопкой «ОТКЛ».
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, изменяйте ток возбуждения  $I_f$  генератора G4 в диапазоне 0...0,2 А и заносите показания амперметра P1.1 (ток  $I_f$ ) и вольтметра P1.2 (э.д.с.  $E_0$  генератора G4) в таблицу 1.1

*Таблица 1.1.*

[illegible]

|                             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b>A</b>                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>E<sub>0</sub>,<br/>В</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- По завершении эксперимента у источника G2 поверните регулировочную ручку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку "ОТКЛ." и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите выключатель A6 нажатием кнопки "ОТКЛ.". Отключите источник G1 нажатием на кнопку – гриб, и последующим отключением ключа – выключателя. Отключите выключатель "СЕТЬ" возбудителя G3, выключателей A6 и A8, блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.

- Используя результаты табл. 1.1, постройте искомую характеристику холостого хода  $E_0=f(I_f)$ .

*Снятие характеристики короткого замыкания  $I_K=f(I_f)$  генератора постоянного тока с независимым возбуждением.*

### **Описание электрической схемы соединений**

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.(при

Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания регулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока G4, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока M1, работающей в режиме синхронного двигателя.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Машина (синхронный двигатель) M1 получает питание от источника G1 через трехфазную трансформаторную группу A2 и выключатель A6.

Реостат A9 выполняет роль резистора синхронизации и подключается выключателем A8 к обмотке возбуждения синхронного двигателя M1 на этапе пуска последнего.

С помощью мультиметров блока P1 контролируются ток возбуждения  $I_f$  и ток  $I_K$  якорной обмотки испытуемого генератора G4.



- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Переключатели режима работы источника G2, возбудителя G3 и выключателей A6 и A8 установите в положение "РУЧН."
- Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- В трехфазной трансформаторной группе A2 установите номинальное напряжение вторичных обмоток трансформаторов равным 230 В.
- Установите в каждой фазе реостата A3 сопротивление 8 Ом.
- Включите выключатель «СЕТЬ» выключателей A6 и A8, блока мультиметров P1, указателя частоты вращения P3.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
- Включите выключатель A8 кнопкой «ВКЛ».
- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите на его выходе напряжение равным 20 В.
- Включите выключатель A6 кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель M1 должен начать вращаться и стрелка указателя частоты должна отклониться **влево**.
- Нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3. Двигатель M1 при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью.
- Отключите выключатель A8 кнопкой «ОТКЛ».
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, изменяйте ток возбуждения  $I_f$  генератора G4 в диапазоне 0...0,15 А и заносите показания амперметров P1.1 (ток  $I_f$ ) и P1.2 (ток  $I_k$ ) в таблицу 1.2.

Таблица 1.2.

|          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $I_f, A$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_k, A$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- По завершении эксперимента у источника G2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку "ОТКЛ." и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите выключатель A6 нажатием кнопки "ОТКЛ.". Отключите источник G1 нажатием на кнопку – гриб, и последующим отключением ключа – выключа-



теля. Отключите выключатель "СЕТЬ" возбудителя G3, выключателей A6 и A8, блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.

- Используя результаты табл. 1.2, постройте искомую характеристику короткого замыкания  $I_k=f(I_f)$ .

*Снятие внешней  $U=f(I)$ , регулировочной  $I_f=f(I)$  и нагрузочной  $U=f(I_f)$  характеристик генератора постоянного тока с независимым / параллельным возбуждением*

### **Описание электрических схем соединений**

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.(рис 8.9(1,2);8.10)

Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания регулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока G4, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением.

Активная нагрузка A10 используется для нагружения генератора G4.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока M1, работающей в режиме синхронного двигателя.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Машина (синхронный двигатель) M1 получает питание от источника G1 через трехфазную трансформаторную группу A2 и выключатель A6 и позволяет снимать требуемые характеристики генератора G4 при постоянстве частоты вращения  $n$ .

Реостат A9 выполняет роль резистора синхронизации и подключается выключателем A8 к обмотке возбуждения синхронного двигателя M1 на этапе пуска последнего.

Реостат A11 ограничивает ток в цепи возбуждения генератора постоянного тока G4.

Реостат A13 повышает дискретность изменения тока возбуждения генератора G4.

С помощью мультиметров блока P1 контролируются ток возбуждения  $I_f$ , ток  $I$  и напряжение  $U$  якорной обмотки испытуемого генератора G4.

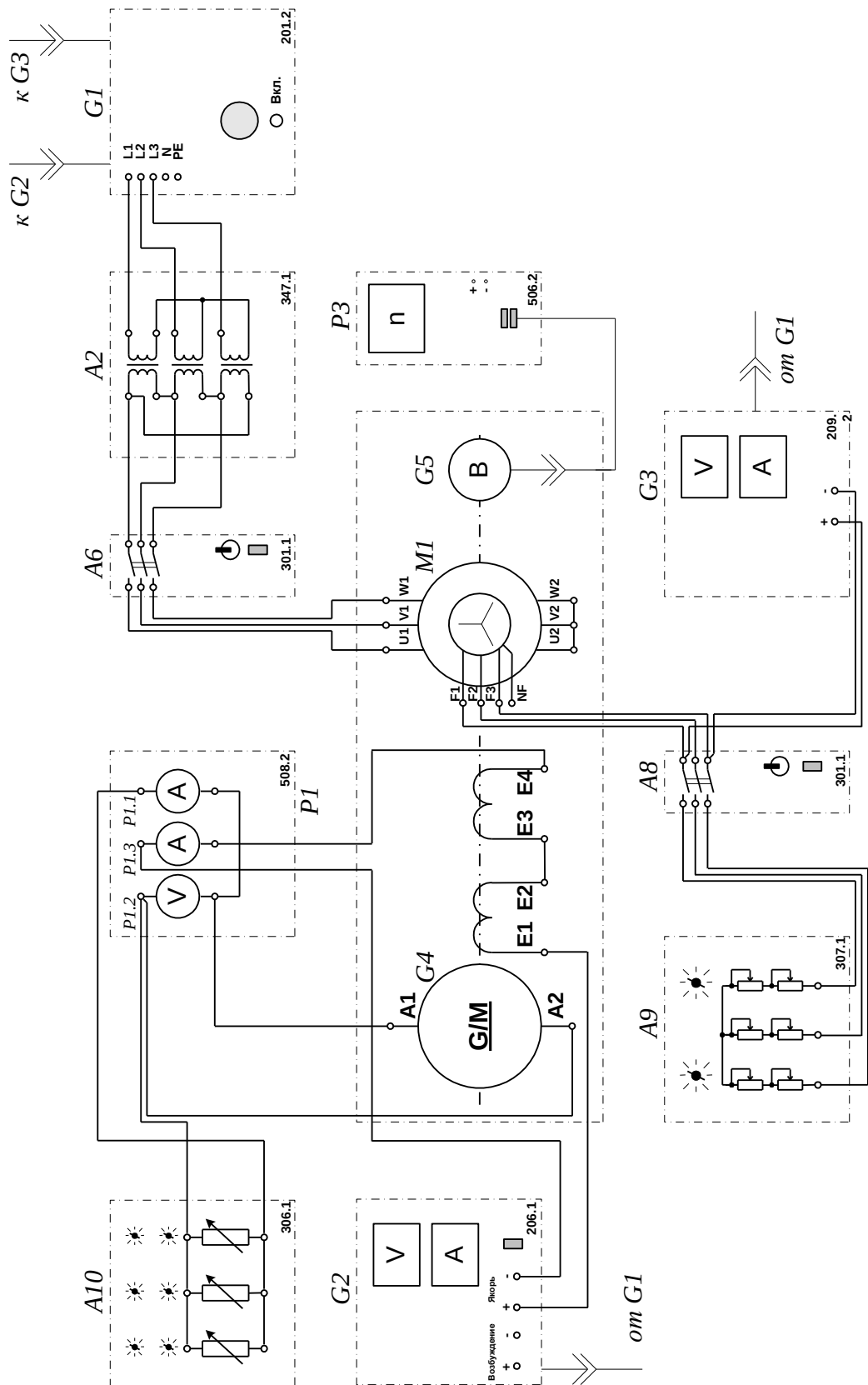


Рисунок 8.9 (а)- Электрическая схема соединений (вариант 1)

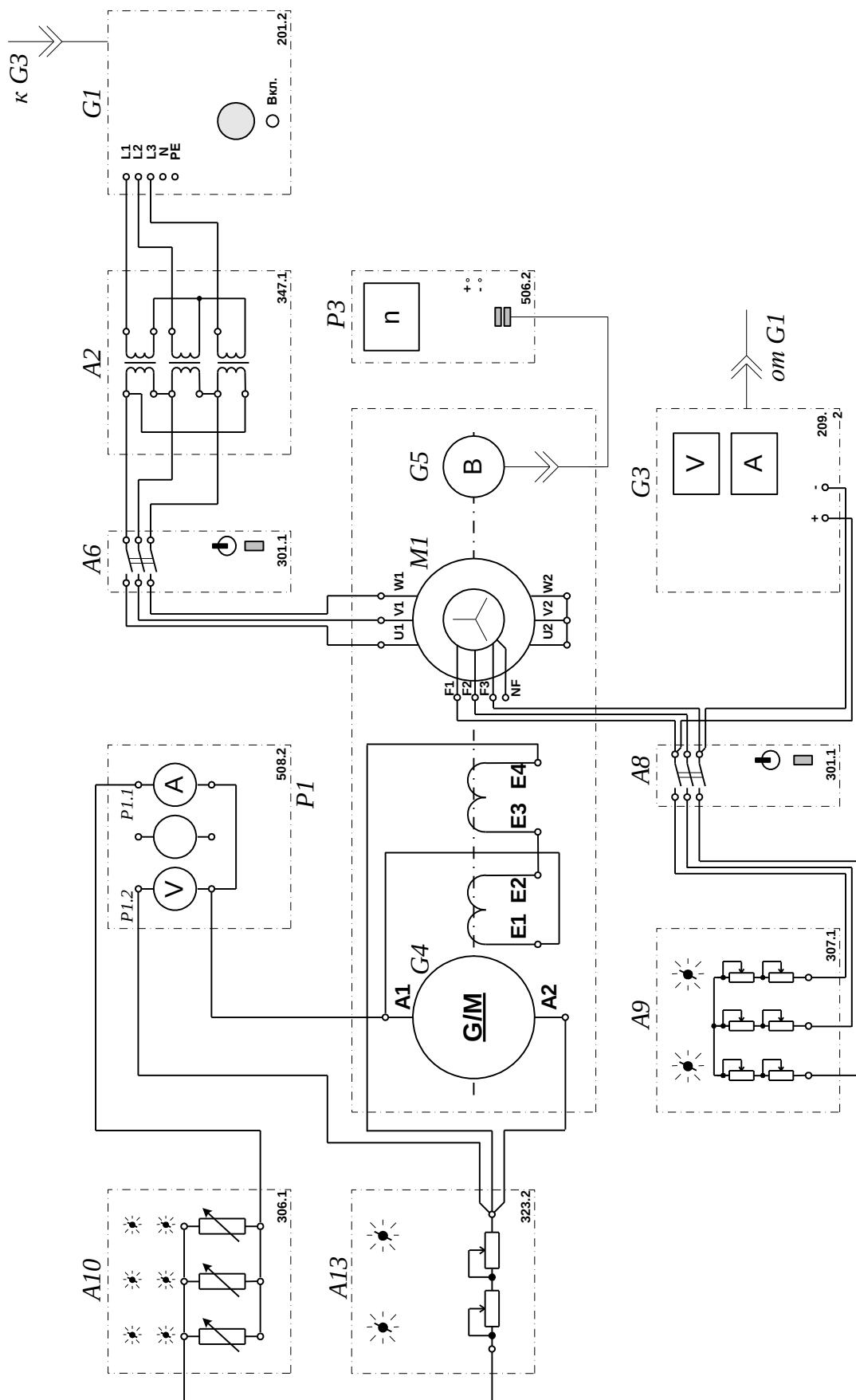


Рисунок 8.9 (2) - Электрическая схема соединений (вариант 2)



## Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (Приложение Б).
- Соедините гнезда защитного заземления "" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1.

### Генератор постоянного тока с независимым возбуждением

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (вариант 1).
- Переключатели режима работы источника G2, возбудителя G3 и выключателей A6 и A8 установите в положение "РУЧН".
- Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- Регулировочные рукоятки активной нагрузки A10 установите в положение "0"
- В трехфазной трансформаторной группе A2 установите номинальное напряжение вторичных обмоток трансформаторов равным 230 В.
- Установите в каждой фазе реостата A3 сопротивление 8 Ом.
- Включите выключатель «СЕТЬ» выключателей A6 и A8, блока мультиметров P1, указателя частоты вращения P3.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
- Включите выключатель A8 кнопкой «ВКЛ».
- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите на его выходе напряжение равным 20 В.
- Включите выключатель A6 кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель M1 должен начать вращаться.
- Нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3. Двигатель M1 при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью. Частота его вращения  $n$  должна достичь  $1500 \text{ мин}^{-1}$ .
- Отключите выключатель A8 кнопкой «ОТКЛ».
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.

- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, установите и поддерживайте неизменным в ходе эксперимента ток возбуждения  $I_f$ , равным, например, 0,1 А.

- Перемещая регулировочные рукоятки нагрузки A10, изменяйте ток  $I$  якорной обмотки генератора G4 и заносите показания амперметра P1.1 (ток  $I$ ) и вольтметра P1.2 (напряжение  $U$  якорной обмотки генератора G4) в таблицу 1.3.1

Таблица 1.3.1

|                          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b><math>I</math>, А</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b><math>U</math>, В</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- Верните регулировочные рукоятки активной нагрузки A10 в положение "0".

- Установите путем регулирования тока возбуждения  $I_f$  напряжение  $U$  якорной обмотки генератора G4, равным, например, 140 В.

- Перемещая регулировочные рукоятки активной нагрузки A10 по часовой стрелке и поддерживая путем регулирования тока возбуждения  $I_f$  напряжение  $U$  якорной обмотки неизменным и равным 140 В, изменяйте ток  $I$  якорной обмотки генератора G4 и заносите показания амперметров P1.1 (ток  $I$ ) и P1.3 (ток  $I_f$ ) в таблицу 1.4.1

Таблица 1.4.1

|                            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b><math>I</math>, А</b>   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b><math>I_f</math>, А</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- Меняя положение регулировочных рукояток активной нагрузки A10 и поддерживая путем регулирования тока возбуждения  $I_f$  ток  $I$  якорной обмотки неизменным и равным, например, 0,15 А, изменяйте напряжение  $U$  якорной обмотки генератора G4 и заносите показания вольтметра P1.2 (напряжение  $U$ ) и амперметра P1.3 (ток  $I_f$ ) в таблицу 1.5.1

Таблица 1.5.1

|                            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b><math>I_f</math>, А</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b><math>U</math>, В</b>   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- По завершении эксперимента у источника G2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку "ОТКЛ." и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите выключатель A6 нажатием кнопки "ОТКЛ.". Отключите ис-

точник G1 нажатием на кнопку – гриб, и последующим отключением ключа – выключателя. Отключите выключатель "СЕТЬ" возбудителя G3, выключателей A6 и A8, блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.

- Используя данные табл. 1.3.1...1.3.3 постройте:
  - внешнюю характеристику  $U = f(I)$  при  $n = \text{const}$ ,  $I_f = \text{const}$  (табл. 1.3.1.);
  - регулировочную характеристику  $I_f = f(I)$  при  $n = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$  (табл. 1.3.2.);
  - нагрузочную характеристику  $U = f(I_f)$  при  $n = \text{const}$ ,  $I = \text{const}$  (табл. 1.3.3.).

### **Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением**

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (вариант 2).
- Переключатели режима работы возбудителя G3 и выключателей A6 и A8 установите в положение "РУЧН."
- Регулировочные рукоятки возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- Регулировочные рукоятки активной нагрузки A10 установите в положение "0".
- В трехфазной трансформаторной группе A2 установите номинальное напряжение вторичных обмоток трансформаторов равным 230 В.
- Установите в каждой фазе реостата A3 сопротивление 8 Ом.
- Установите суммарное сопротивление реостата A13, равным 200 Ом и закоротите его проводником.
- Включите выключатель «СЕТЬ» выключателей A6 и A8, блока мультиметров P1, указателя частоты вращения P3.
  - Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
  - Включите выключатель A8 кнопкой «ВКЛ».
  - Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
  - Включите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите на его выходе напряжение равным 20 В.
  - Включите выключатель A6 кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель M1 должен начать вращаться и стрелка указателя частоты P3 должна отклониться вправо.

- Нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3. Двигатель М1 при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью. Частота его вращения  $n$  должна достичь  $1500 \text{ мин}^{-1}$ .

- Отключите выключатель А8 кнопкой «ОТКЛ». В результате генератор постоянного тока G4 должен самовозбудиться.

- Перемещая регулировочные рукоятки нагрузки А10 по часовой стрелке, измените ток  $I$  якорной обмотки генератора G4 и заносите показания амперметра Р1.1(ток  $I$ ) и вольтметра Р1.2 (напряжение  $U$  якорной обмотки генератораG4) в таблицу 1.3.2.

- Перенесите закоротку с реостата А13 на активную нагрузку А10.

- Уменьшая сопротивление реостата А13 до нуля, продолжайте заносить показания амперметра Р1.1(ток  $I$ ) и вольтметра Р1.2 (напряжение  $U$  якорной обмотки генератораG4) в таблицу 1.3.2.

Таблица 1.3.2.

|              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b>И, А</b>  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>UU, В</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- Отключите выключатель А6 нажатием кнопки "ОТКЛ.". Двигатель М1 должен остановиться.

- Нажмите кнопку "ОТКЛ." возбудителя G3.

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (вариант 3).

- Установите сопротивления реостата возбуждения А11 и реостата А13, равными 0 Ом.

- Включите выключатель А8 кнопкой «ВКЛ».

- Включите выключатель А6 кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель М1 должен начать вращаться и стрелка указателя частоты Р3 должна отклониться вправо.

- Нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3. Двигатель М1 при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью. Частота его вращения  $n$  должна достичь  $1500 \text{ мин}^{-1}$ .

- Отключите выключатель А8 кнопкой «ОТКЛ». В результате генератор постоянного тока G4 должен самовозбудиться.

- Установите, изменяя сопротивления реостата возбуждения А11 и реостата А13, напряжение  $U$  якорной обмотки генератора G4, например, на уровне 90 В.



• Перемещая регулировочные рукоятки активной нагрузки А10 и поддерживая путем изменения сопротивления реостата возбуждения А11 и реостата А13 напряжение  $U$  якорной обмотки неизменным и равным 90 В, изменяйте ток  $I$  якорной обмотки генератора G4 и заносите показания амперметров Р1.1 (ток  $I$ ) и Р1.3 (ток  $I_f$ ) в таблицу 1.4.2.

Таблица 1.4.2.

|                            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b><math>I</math>, А</b>   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b><math>I_f</math>, А</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

• Меняя положение регулировочных рукояток активной нагрузки А10 и поддерживая путем изменения сопротивления реостата возбуждения А11 и реостата А13 ток  $I$  якорной обмотки неизменным и равным, например, 0,15 А, изменяйте напряжение  $U$  якорной обмотки генератора G4 и заносите показания вольтметра Р1.2 (напряжение  $U$ ) и амперметра Р1.3 (ток  $I_f$ ) в таблицу 1.5.2.

Таблица 1.5.2.

|                            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b><math>I_f</math>, А</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b><math>U</math>, В</b>   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

• По завершении эксперимента отключите выключатель А6 нажатием кнопки "ОТКЛ.". Отключите источник G1 нажатием на кнопку – гриб, и последующим отключением ключа – выключателя. Отключите выключатель "СЕТЬ" возбудителя G3, выключателей А6 и А8, блока мультиметров Р1 и указателя частоты вращения Р3.

• Используя данные табл. 1.3.2...1.5.2 постройте:

- внешнюю характеристику  $U = f(I)$  при  $n = \text{const}$ ,  $I_f = \text{const}$  (табл. 1.3.2.);
- регулировочную характеристику  $I_f = f(I)$  при  $n = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$  (табл. 1.4.2.);
- нагрузочную характеристику  $U = f(I_f)$  при  $n = \text{const}$ ,  $I = \text{const}$  (табл. 1.5.6.).

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите условия введения ГПТ для работы параллельно с сетью бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности.
2. Назовите условия нагружения ГПТ, работающего на сеть бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности.
3. Как регулируется возбуждение параллельно работающих ГПТ, работающих на сеть бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности?
4. Поясните вид внешней характеристики ГПТ с последовательным возбуждением.
5. В каких установках применяют компаундные ГПТ с разными схемами включения шунтовой и серийной обмоток возбуждения?
6. Как классифицируется ГПТ в зависимости от способа возбуждения?
7. Пояснить внешний вид характеристики холостого хода.
8. Пояснить внешний вид внешней характеристики.
9. Пояснить внешний вид регулировочной характеристики.
10. Назовите условия введения ГПТ для работы параллельно с сетью бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности.
11. Назовите условия нагружения ГПТ, работающего на сеть бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности.
12. Как регулируется возбуждение параллельно работающих ГПТ, работающих на сеть бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности?
13. Поясните вид внешней характеристики ГПТ с последовательным возбуждением.
14. В каких установках применяют компаундные ГПТ с разными схемами включения шунтовой и серийной обмоток возбуждения?
15. Как классифицируется ГПТ в зависимости от способа возбуждения?
16. Пояснить внешний вид характеристики холостого хода.
17. Пояснить внешний вид внешней характеристики
18. Пояснить внешний вид регулировочной характеристики.

**Лабораторная работа № 9. Управление двигателями и КПД машин постоянного тока. Пуск в ход двигателя постоянного тока с независимым / параллельным / последовательным возбуждением с регистрацией и отображением режимных параметров на компьютере. Определение механической характеристики  $n=f(M)$  двигателя постоянного тока с независимым/параллельным / последовательным возбуждением. Определение рабочих характеристик  $n=f(P_2)$ ,  $M=f(P_2)$ ,  $\eta=f(P_2)$  двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.**

**Цель работы:** Определить механические характеристики  $n=f(M)$  двигателя постоянного тока с независимым / параллельным / последовательным возбуждением. Определить рабочие характеристики  $n=f(P_2)$ ,  $M=f(P_2)$ ,  $\eta=f(P_2)$  двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

### **Теоритическая часть**

Все процессы, происходящие в машинах постоянного тока (МПТ), могут быть объяснены с использованием четырех правил, характеризующих электромагнитные явления (приложение А):

- 1) правило получения электрического тока – "Нужно в замкнутый контур  $K$  поместить источник э.д.с.  $E$ . В таком контуре потечет ток  $I$ ";
- 2) правило получения магнитного поля – "Нужно в проводнике создать электрический ток  $I$ . Вокруг такого проводника будет образовано магнитное поле  $\Phi$ ";
- 3) правило получения механической силы – "Нужно проводник с током  $I$  поместить в магнитное поле  $\Phi$ . На такой проводник будет действовать механическая сила  $F$ ";
- 4) правило получения индукционной э.д.с.  $E$  – "При всяком изменении магнитного поля  $\Phi$ , пронизывающем контур  $K$ , в контуре наводится э.д.с.  $E$ ; направление индукционной э.д.с. определяется правилом Ленца, причем перед применением правила контур с э.д.с. надо замкнуть".

Четвертое правило применительно к МПТ можно заменить на более простое правило правой руки (рис.9.1), причем процедура определения направления индукционной э.д.с.  $E$  существенно проще правила Ленца.

Пусть контур (рис.9.1,а), вращающийся с частотой  $\omega$  в магнитном поле, характеризуемым индукцией  $B$  поля, за время  $dt$  повернется на угол  $d\alpha$ , причем  $d\alpha=\omega \cdot dt$ . При поперечном  $D$  и продольном  $l$  размерах контура изменение площади  $dS$ , которую пронизывают линии магнитного поля индукцией  $B$ , за время  $dt$  будет равно

$$dS = l \cdot D \cdot d\alpha = l \cdot D \cdot \omega \cdot dt ,$$

а изменение  $d\Phi$  магнитного потока  $\Phi$  за то же время  $dt$  составит

$$d\hat{O} = \hat{A} \cdot dS = \hat{A} \cdot l \cdot D \cdot \omega \cdot dt$$

В контуре в соответствии с явлением электромагнитной индукции наведётся э.д.с.  $E_2$ , равная

$$E_2 = \frac{d\hat{O}}{dt} = \frac{\hat{A} \cdot l \cdot D \cdot \omega \cdot dt}{dt} = \hat{A} \cdot l \cdot D \cdot \omega = 2 \cdot \hat{A} \cdot l \cdot \underbrace{\frac{D}{2}}_v \cdot \omega = 2 \cdot \hat{A} \cdot l \cdot v,$$

где  $v$  - линейная скорость перемещения проводника относительно поля.

При вращении контура относительно поля перемещаются два продольных проводника  $l$ , и, поэтому в каждом из них будет наведена э.д.с.  $E$ , составляющая ровно половину э.д.с.  $E_2$ . Учитывая это, в каждом из проводников контура, перемещающемся в магнитном поле, будет наведена э.д.с., равная

$$E = \hat{A} \cdot l \cdot v$$

Формулой установлено правило получения индукционной э.д.с.  $E$  в МПТ: "В проводнике, перемещающемся со скоростью  $v$  в магнитном поле с индукцией  $B$ , наводится э.д.с.  $E$ ".

Направление э.д.с.  $E$ , определенное с помощью правила Ленца будет таким, как показано на рис.9.1,а.

Построения, приведенные на рис.9.1,а и вид формулы), приводят к правилу правой руки (рис.9.1,б): "Правую руку нужно расположить так, чтобы в ладонь входили линии магнитного поля  $\Phi$ , а большой отогнутый палец указывал на направление перемещения проводника в поле, то на направление э.д.с. укажут остальные четыре пальца".

Отмечаем, что правило правой руки не является универсальным, каким является правило Ленца, применительно к базовому определению получения индукционной э.д.с., но его применение при анализе МПТ является более простым и, поэтому, предпочтительным.

#### Основная часть.

Двигатель постоянного тока (ДПТ) содержит (рис.9.2):

- обмотку возбуждения (ОВ), расположенную на статоре; к ОВ приложено постоянное напряжение возбуждения  $U_{ОВ}$ , которое создаёт в ней постоянный ток  $I_{ОВ}$ , который создает постоянное магнитное поле возбуждения  $\Phi_{ОВ}$ ; с помощью полюсных наконечников, называемых из-за их формы, полюсными башмаками, вдоль их создается постоянное по величине магнитное поле, направленное к центру или от центра ДПТ; это поле называется основным  $\Phi_{осн}$ ;

- ротор, называемый в ДПТ якорем; к обмотке якоря через расположенные на нем пластины коллектора и прилегающие к пластинам щетки, подводится внешнее постоянное напряжение, называемое напряжением якоря  $U_я$ ; это напряжение создает в обмотке якоря

постоянный ток якоря  $I_A$ .

*Принцип действия ДПТ* состоит в следующем: на проводники якоря, обтекаемые током  $I_A$ , помещенные в магнитное поле  $\Phi_{ОВ}$  обмотки возбуждения, действуют механические силы  $F$ . Направление сил  $F$  определяется правилом левой руки, что отображено на рис.9.2.

Проводники обмотки якоря укладываются в пазы якоря и подключаются к пластинам коллектора таким образом, что в частях обмотки якоря, расположенных по разные стороны относительно щеток, токи имеют одно и то же направление. Благодаря такому исполнению якоря, силы  $F$ , действующие на все проводники якорной обмотки, создают одинаковые по направлению вращающие моменты, следовательно, складываются и этим заставляют ротор вращаться в одну сторону, например против часовой стрелке, как показано на рис.9.2. Направление вращения якоря с частотой  $\omega$  совпадает с направлением момента  $M$ . Если изменить полярность приложенного к якорю напряжения  $U_A$ , то изменится направления тока  $I_A$  во всех проводниках обмотки якоря, и ДПТ будет вращаться в другую сторону.

Помимо основного эффекта – получения вращающего момента  $M$ , в ДПТ существует *побочный эффект* – возникновение в якоре э.д.с. вращения  $E$ . Эта э.д.с. возникает за счет того, что проводники якоря перемещаются в магнитном поле обмотки возбуждения  $\Phi_{ОВ}$ . Направление э.д.с. вращения  $E$ , определенное по правилу правой руки, противоположно току  $I_A$ . Так как ток  $I_A$  создается приложенным к якорю ДПТ напряжением  $U_A$ , то направления  $I_A$  и  $U_A$  совпадают, а э.д.с. вращения  $E$  направлена навстречу к  $U_A$ . Поэтому э.д.с. вращения  $E$  называют также *противо-э.д.с.* Установленное соотношение между направлениями  $E$  и  $U_A$  позволяет записать следующее уравнение цепи якоря ДПТ:

$$U_B - E = R_B I_B \quad \Rightarrow \quad U_B = E + R_B I_B$$

В соответствии с (9.2) э.д.с. вращения  $E$  прямо пропорционально индуктивности  $B$  магнитного поля возбуждения, размерам обмотки  $D$  и  $l$  и частоте вращения  $\omega$  якоря. Указанную пропорциональность принято записывать в виде

$$E = c_F \omega,$$

где  $c_F$  – коэффициент магнитного потока ДПТ.

Уравнение якорной цепи ДПТ примет вид

$$U_B = c_F \omega + R_B I_B$$

#### **Указание по технике безопасности:**

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение.

#### **Описание электрических схем соединений**

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.(рис 9.3 (1,2,3);рис 9.4)

Источник питания G2 двигателя постоянного тока используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока M2, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением и для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и обмотки возбуждения машины постоянного тока M2, работающей в режиме двигателя с параллельным / последовательным возбуждением.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока G6, работающей в режиме синхронного генератора.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Синхронный генератор G6 питает активную нагрузку A10, выступая в качестве нагрузочной машины.

Реостат A13 ограничивает пусковой ток двигателя M2.

Выключатель A6 предназначен для шунтирования реостата A13 после разгона двигателя M2.

Датчики тока и напряжения в блоке A12 обеспечивают гальваническую развязку силовой и измерительной цепей и преобразуют ток и напряжение якорной обмотки испытуемого двигателя M2 в пропорциональные им нормированные напряжения.

Через аналоговые входы АСН0-АСН8, АСН1-АСН9, АСН2-АСН10, АСН3-АСН11 коннектора A4 напряжения, пропорциональные току и напряжению якорной обмотки, току обмотки возбуждения и частоте вращения испытуемого двигателя M2, вводятся в компьютер A5.

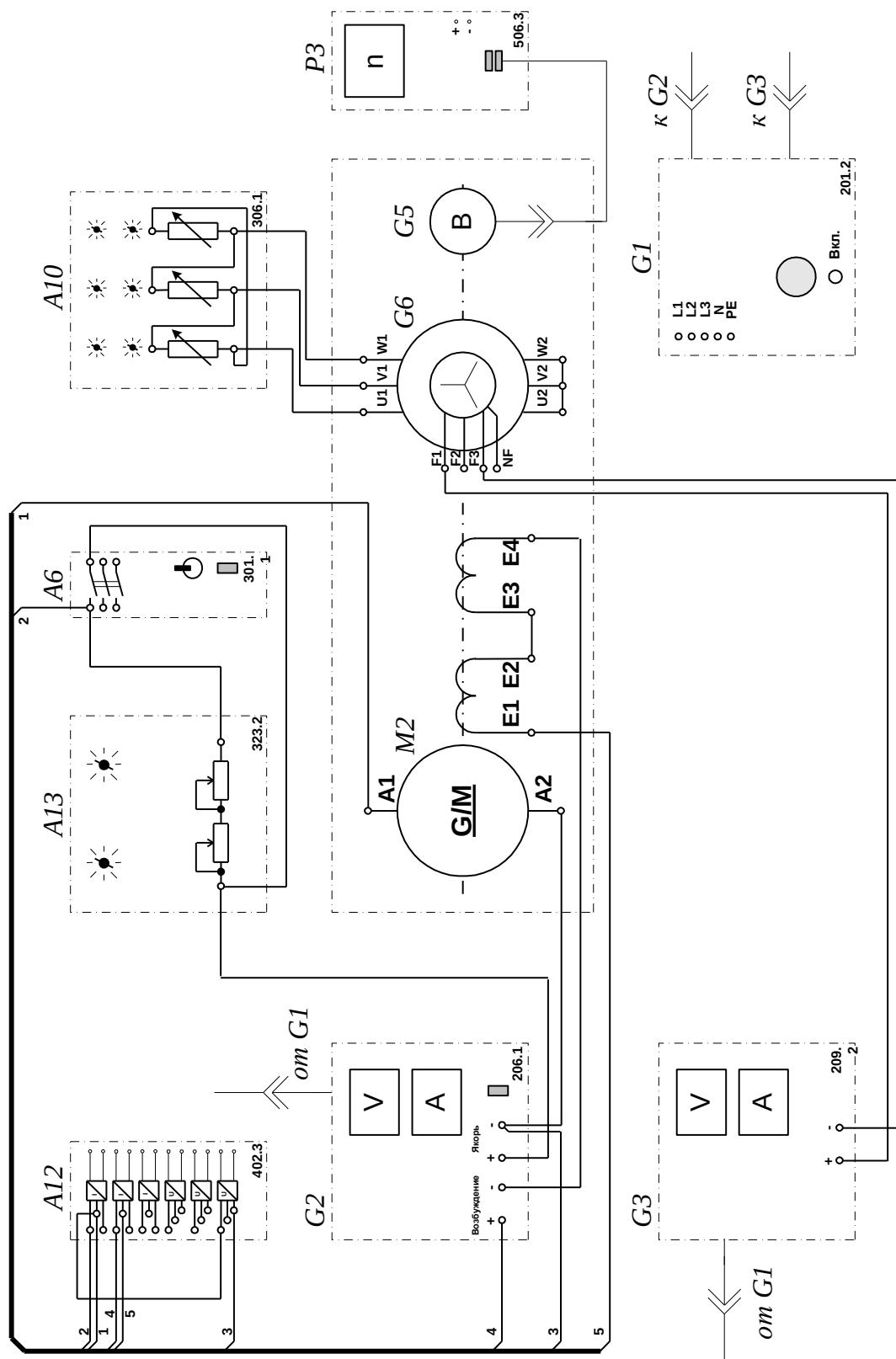


Рисунок 9.3 (1) -Электрическая схема соединений (вариант 1)

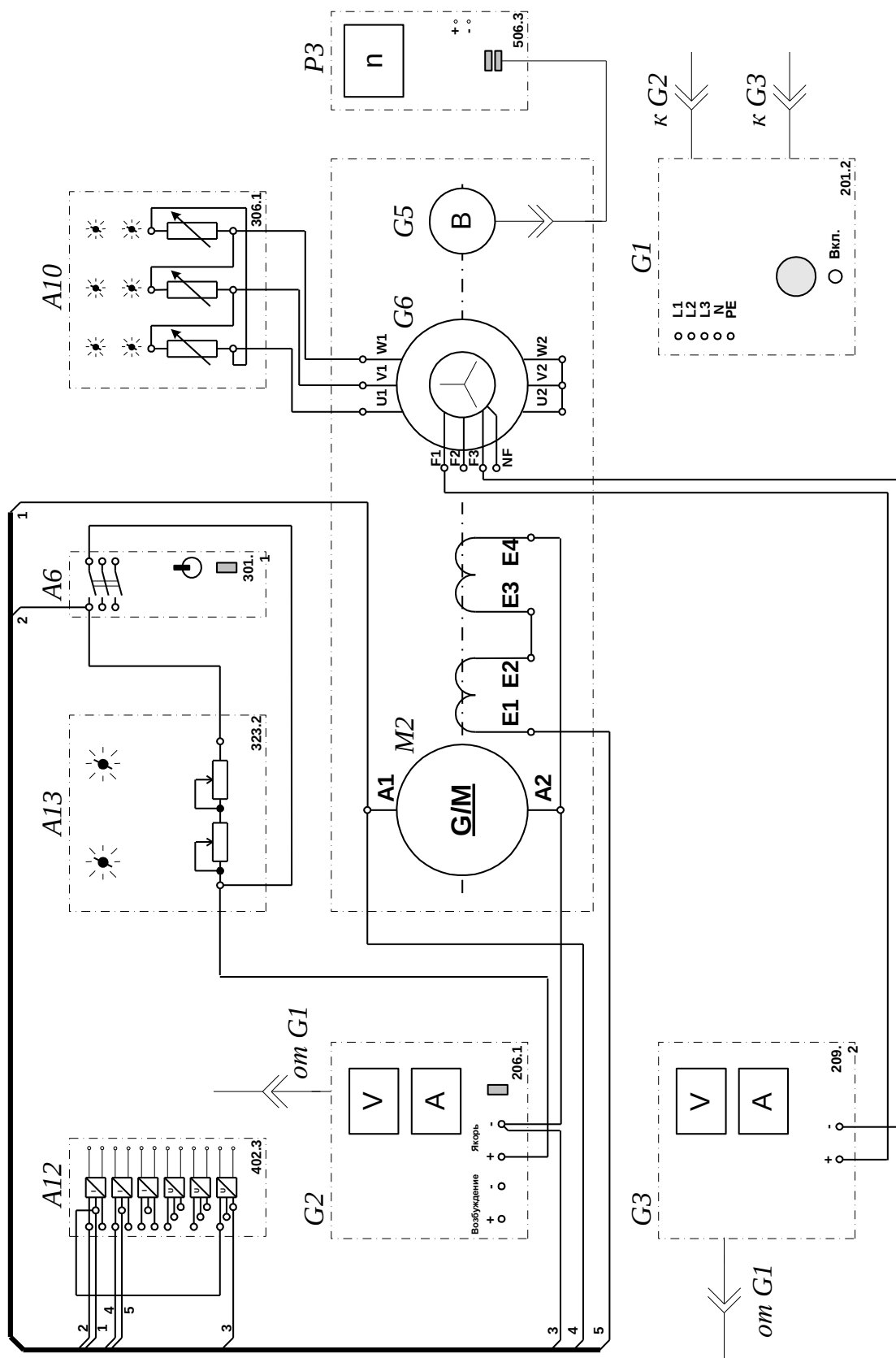


Рисунок 9.3(2) - Электрическая схема соединений (вариант 2)



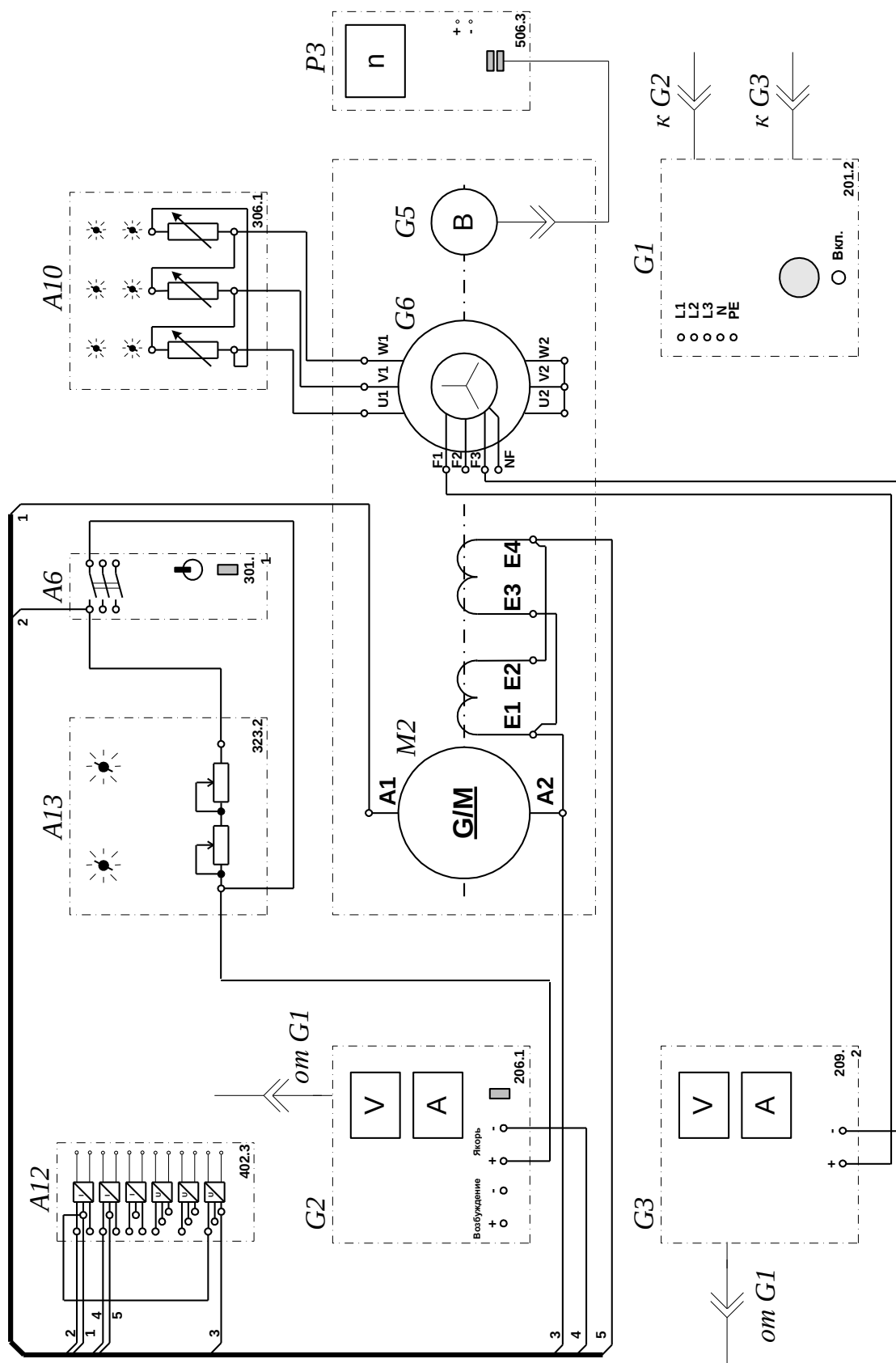


Рисунок 9.3(3)- Электрическая схема соединений (вариант 3)

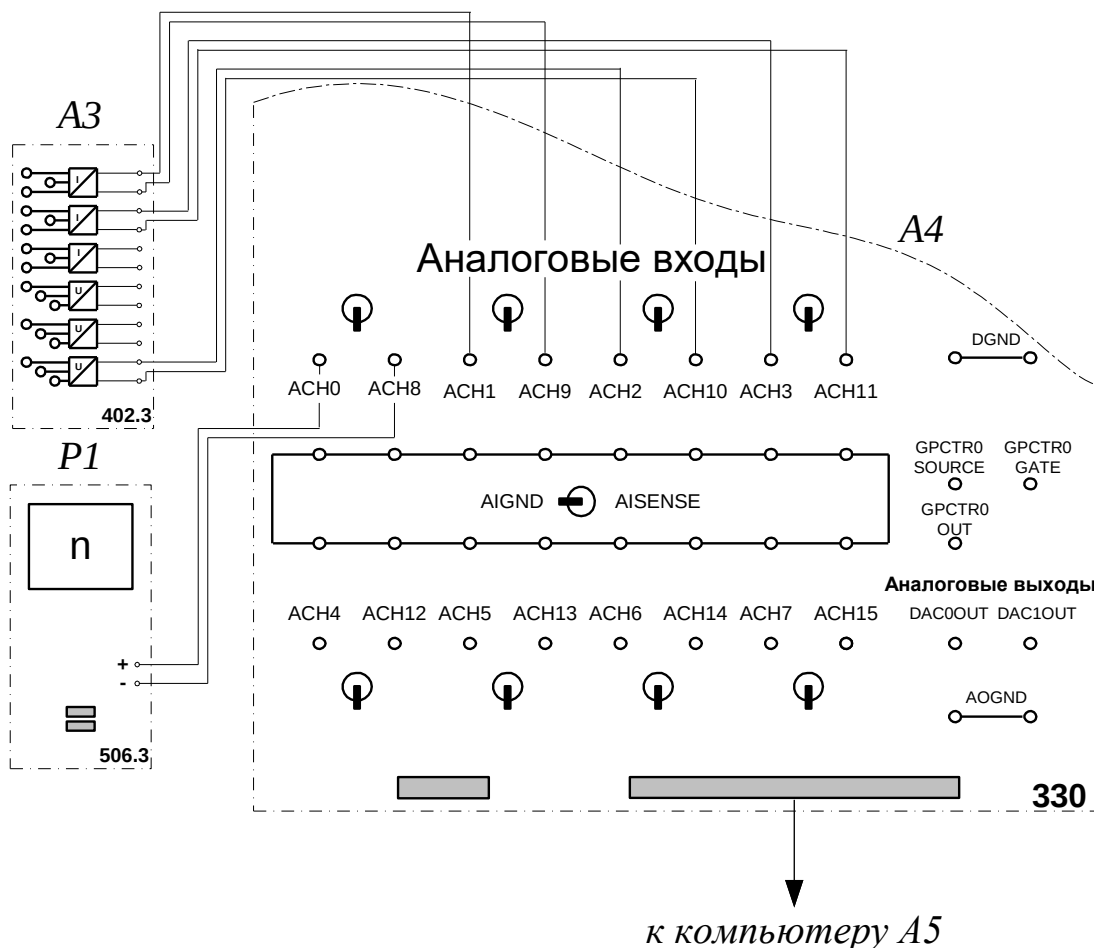


Рисунок 9.4 - Электрическая схема соединений (продолжение)

#### Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (стр. 14).
- Соедините гнезда защитного заземления " " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (**вариант 1 для исследования двигателя с независимым возбуждением**) / (**вариант 2 для исследования двигателя с параллельным возбуждением**) / (**вариант 3 для исследования двигателя с последовательным возбуждением**).
- Переключатели режима работы источника G2, возбудителя G3 и выключателя A6 установите в положение «РУЧН.».
- Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- Установите суммарное сопротивление реостата A3 равным, например, 100 Ом.
- Установите в каждой фазе активной нагрузки A10 суммарную ее величину 100 %.
- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер A5, и запустите прикладную программу «Регистратор режимных параметров машины постоянного тока».
- Включите выключатель «СЕТЬ» выключателя A6, блока датчиков тока и напряжения A12, указателя частоты вращения P3.
- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

- Включите выключатель «СЕТЬ» источника G2 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите на его выходе «ЯКОРЬ» напряжение, например, равное 200 В.
- Включите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите на его выходе напряжение, например, равное 10 В.
- Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» на экране компьютера.
- Нажмите последовательно кнопки «ВКЛ.» возбудителя G3, источника G2, спустя, например, 2 с выключателя A6 и не позднее, чем через 10 с, остановите сбор данных нажатием на виртуальную кнопку «Остановить». В результате должен осуществиться двухступенчатый пуск нагруженного двигателя постоянного тока M2 и должны записаться в компьютер данные о режимных параметрах на интервале пуска.
- Остановите запись процессов, нажав на виртуальную кнопку «Остановить».
- Нажмите кнопку «ОТКЛ.» источника G1.
- Отключите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3, источника G2, выключателя A6, блока датчиков тока и напряжения A12 и указателя частоты вращения P3.
- Используя возможности программы «Регистратор режимных параметров машины постоянного тока», проанализируйте отображенные на мониторе компьютера механическую характеристику и временные зависимости тока якорной обмотки, электромагнитного момента, частоты вращения двигателя постоянного тока при пуске его в ход.

*Определение механической характеристики  $n=f(M)$  двигателя постоянного тока с независимым / параллельным / последовательным возбуждением*

*Определение механической характеристики  $n=f(M)$  двигателя постоянного тока с независимым / параллельным / последовательным возбуждением*

### **Описание электрических схем соединений**

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания G2 двигателя постоянного тока используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока M2, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением и для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и обмотки возбуждения машины постоянного тока M2, работающей в режиме двигателя с параллельным / последовательным возбуждением.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока G6, работающей в режиме синхронного генератора.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Синхронный генератор G6 питает активную нагрузку A10, выступая в качестве нагрузочной машины.

С помощью мультиметров блока P1 контролируются напряжение и ток якорной обмотки двигателя M2.

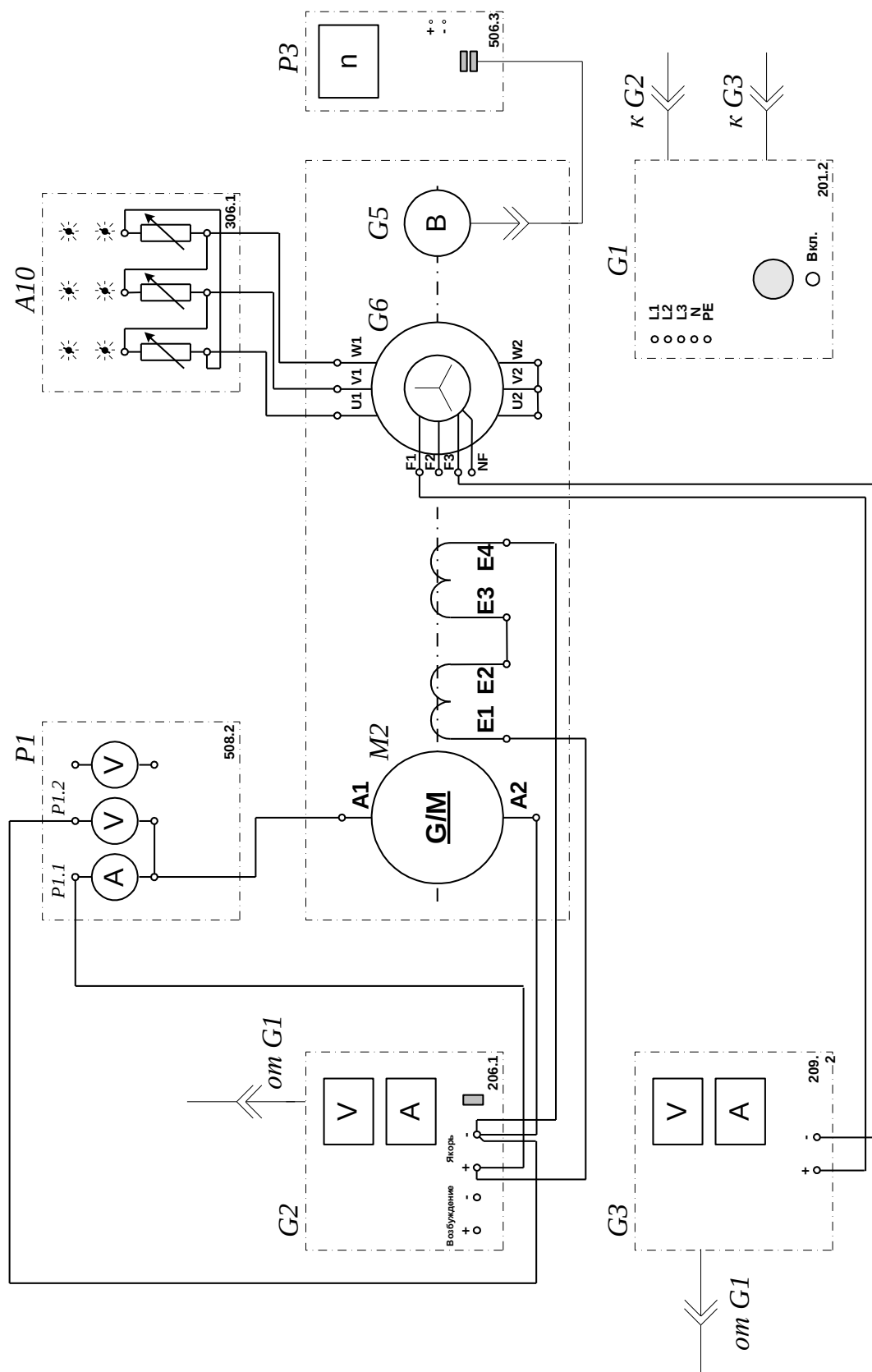


Рисунок 9.5 (1) -Электрическая схема соединений (вариант 1)

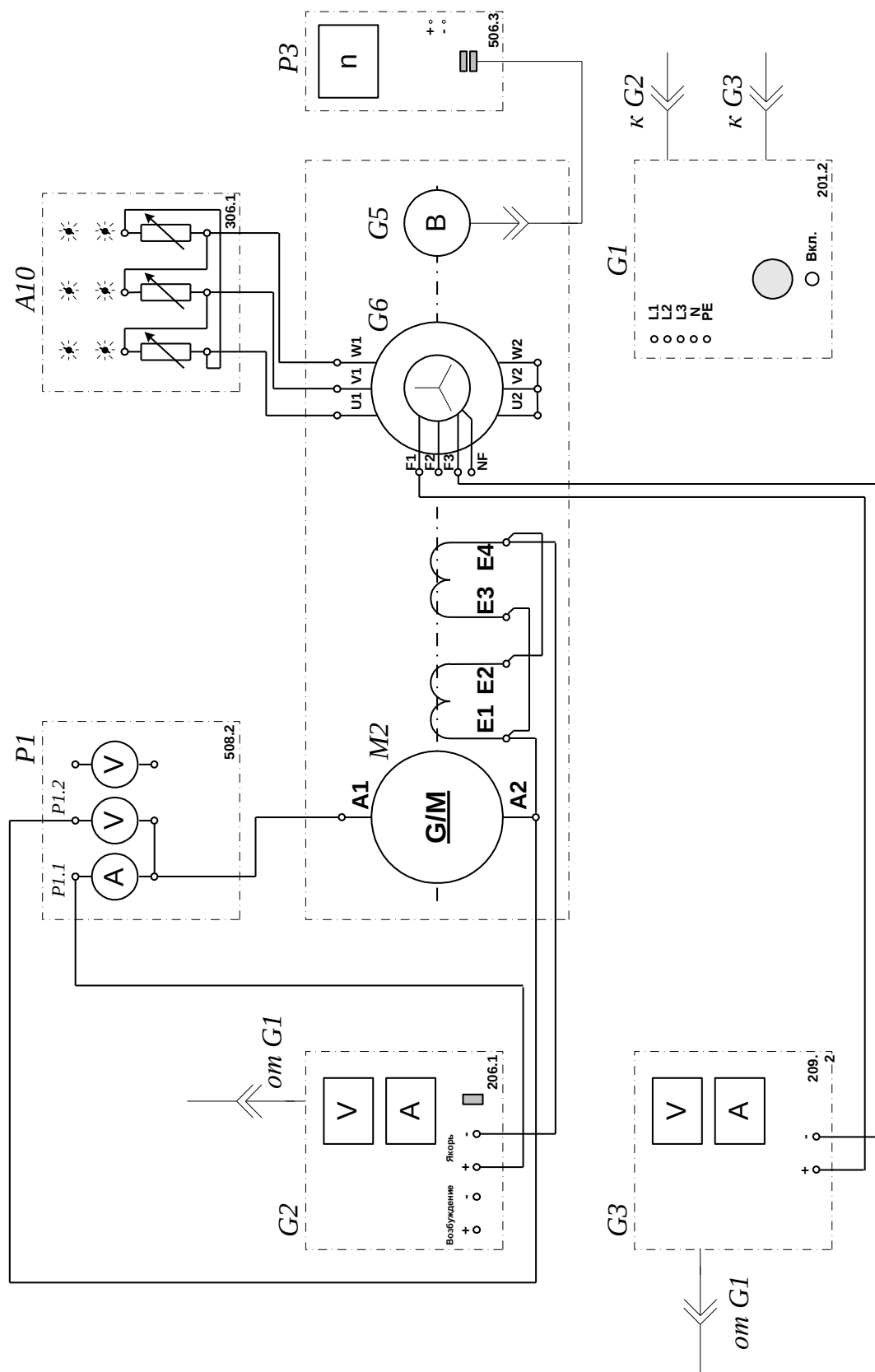


Рисунок 9.5(2)- Электрическая схема соединений (вариант 2)

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

- Соедините гнезда защитного заземления "III" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания G1.

- Переключатели режима работы источника G2 и возбудителя G3 установите в положение "РУЧН."

- Установите в каждой фазе активной нагрузки A10 суммарную ее величину 100 %.

- Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров Р1 и указателя частоты вращения Р3.

- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.

- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, разгоните двигатель M2 до частоты вращения  $n$ , например, равной  $1500 \text{ мин}^{-1}$ .

- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." возбuditеля G3.

• Вращая регулировочную рукоятку возбуждателя G3, изменяйте ток якоря **I** (**ток не должен превышать значения 1,0 А**) двигателя М2 и заносите показания амперметра Р1.1 (ток **I**), вольтметра Р1.2 (напряжение **U** якоря двигателя М2) и указателя Р3 (частота вращения **n**) в таблицу 1.1

[illegible]

• По завершении эксперимента сначала у возбuditеля G3, а затем у источника G2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку "ОТКЛ." и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите источник G1 нажатием на кнопку – гриб.

• Используя данные таблицы 3.2.1, для каждого значения частоты вращения  $n$  вычислите по формуле

$$M = \frac{60}{2\pi n} (U - 65 \cdot I) I \quad [\text{Н} \cdot \text{м}]$$

и занесите в табл. 1.2 значения электромагнитного момента двигателя M2.

Таблица 1.2.

|                                 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b>nn,<br/>мин<sup>-1</sup></b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>MM,<br/>Н·м</b>              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

• Используя данные таблицы 3.2.2 постройте искомую статическую механическую характеристику  $n=f(M)$  двигателя постоянного тока.

### Описание электрической схемы соединений

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты. (рис 9.6)

Источник питания G2 двигателя постоянного тока используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока M2, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока G6, работающей в режиме синхронного генератора.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашиного агрегата.

Синхронный генератор G6 питает активную нагрузку A10, выступая в качестве нагрузочной машины.

Измеритель мощностей P2 служит для измерения активной мощности синхронного генератора G6.

С помощью мультиметров блока P1 контролируются интересующие напряжения и токи.

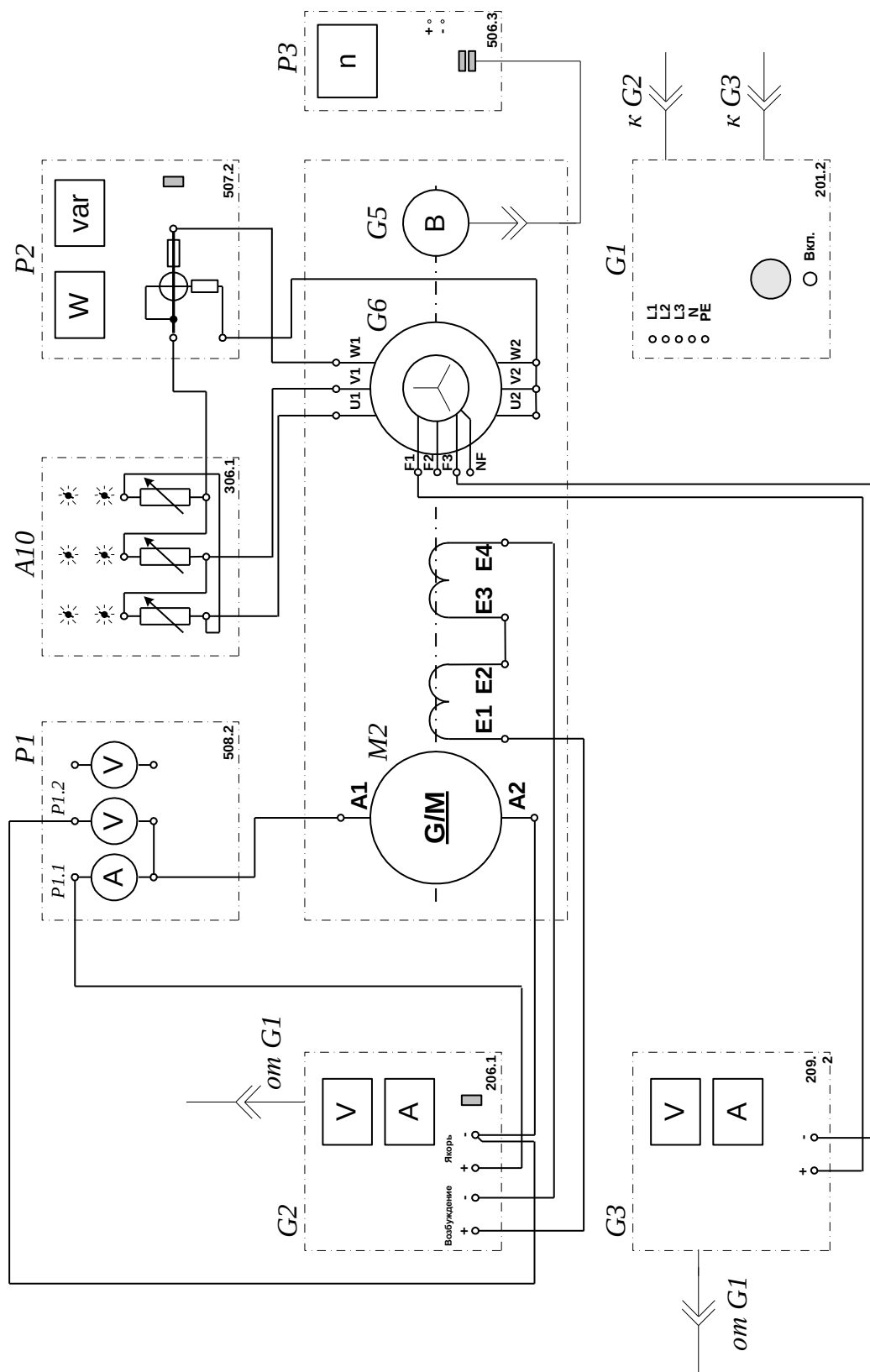


Рисунок 9.6- Электрическая схема соединений



## 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 "III" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений. (Приложение Б)
- Переключатели режима работы источника G2 и возбудителя G3 установите в положение "РУЧН."
- Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- Установите в каждой фазе активной нагрузки A10 суммарную ее величину 100 %.
- Измерьте одним из мультиметров активное сопротивление  $r_c$  статорной обмотки генератора G6 (должно быть примерно равно 21 Ом).
- Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и измерителя мощностей P2.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, разгоните двигатель M2 до частоты вращения  $n$ , например, равной 1500 мин<sup>-1</sup>.
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3.
- Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, изменяйте ток якоря  $I_a$  двигателя M2 в диапазоне 0...1 А и заносите показания ваттметра измерителя P2 (активная мощность  $P'_2$ , потребляемая одной фазой синхронного генератора G6), амперметра P1.1 (ток  $I_a$ ), вольтметра P1.2 (напряжение  $U_a$  якорной обмотки двигателя M2), вольтметра P1.3 (напряжение возбуждения  $U_f$  двигателя M2) и указателя P3 (частота вращения  $n$ ) в таблицу 1..

Таблица 1.3.

|                                             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b><math>P'_2</math>,<br/>Н·м</b>           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b><math>I_a</math>, А</b>                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b><math>U_{U_a}</math>,<br/>В</b>          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b><math>U_{U_f}</math>,<br/>В</b>          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b><math>n</math>,<br/>мин<sup>-1</sup></b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- По завершении эксперимента сначала у возбудителя G3, а затем у источника G2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку "ОТКЛ." и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите источник G1 нажатием на кнопку – гриб.

• Используя данные таблицы 1.3 и измеренное значение активного сопротивления  $r_f$  обмотки возбуждения двигателя М2 для каждого значения частоты вращения  $n$  вычислите и занесите в табл. 3.3.2 значения:

- полезной активной мощности двигателя М2 по формуле

$$P_2 = 3P_2', \text{ [Вт];}$$

- активной мощности, потребляемой из сети двигателем М2

$$P_1 = U_{\text{я}} I_{\text{я}} + \frac{U_f^2}{r_f}, \text{ [Вт];}$$

- электромагнитного момента двигателя М2 по формуле

$$M = \frac{60}{2\pi n} (U_{\text{я}} - 65 I_{\text{я}}) I_{\text{я}}, \text{ [Н} \cdot \text{м];}$$

- коэффициента полезного действия двигателя М2 по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100, \text{ [%],}$$

Таблица 1.4.

|                                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b>n,<br/>мин<sup>-1</sup></b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>РР<sub>2</sub>,<br/>Вт</b>  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>РР<sub>1</sub>,<br/>Вт</b>  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>ММ,<br/>Н·м</b>             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>ηn, %</b>                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

• Используя данные таблицы 1.4 постройте искомые рабочие характеристики  $n = f(P_2)$ ,  $M = f(P_2)$ ,  $\eta = f(P_2)$  двигателя постоянного тока.

## Контрольные вопросы

1. Составьте уравнения цепи обмотки возбуждения и якоря.
2. Выведите выражения ЭМХ и МХ ДПТ.
3. Какие характеристики ДПТ называются естественными, а какие искусственными?
4. Как влияют дополнительные сопротивления  $R_{д\alpha}$  и  $R_{дв}$  на наклон и частоту холостого хода ЭМХ и МХ?
5. Приведите выражения ЭМХ и МХ в общем виде.
6. Приведите выражения ЭМХ и МХ для линейного участка кривой намагничивания стали магнитопровода.
7. Приведите выражения ЭМХ и МХ для насыщенного участка кривой намагничивания стали магнитопровода.
8. Какие недостатки и достоинства имеют серийные ДПТ?
9. Какие способы включения шунтовой и серийной обмоток применяют в компаундном ДПТ?
10. Поясните особенности МХ компаундного ДПТ с параллельно-последовательным возбуждением.
11. Поясните особенности МХ компаундного ДПТ с последовательно-параллельным возбуждением.

## **Лабораторная работа №10. Пуск в ход трехфазных асинхронных двигателей.**

### **Пуск в ход трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым/фазным ротором и отображение режимных параметров на компьютере.**

**Цель работы:** изучить режимы пуска в ход АД

#### **Основы теории:**

Как известно из Г – образной схемы замещения асинхронного двигателя (АД), начальный ток статора двигателя при пуске ( $S=1$ ).

$$I_{1n} \cong \frac{U_1}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}},$$

а ток ротора при  $S \neq 1$

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{S'}\right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}}$$

При работе АД  $S \ll 1$  и  $\frac{r_2'}{S}$  получается значительно больше, чем при  $S=1$ , поэтому по мере разгона АД ток ротора будет уменьшаться, а наибольший ток получается в начале пуска при  $S=1$ . Большая величина пускового тока ротора, а следовательно и тока статора,  $I_{1п} = (4...7) I_{1ном}$ , может приводить к просадке напряжения сети, а это может приводить к «опрокидыванию» (остановке) других двигателей работающих в этой сети, т.к.

$$M_{эм} = U_1^2.$$

Поэтому пусковые токи мощных АД необходимо ограничивать, чтобы не было значительной просадки напряжения. Это можно сделать путем снижения подводимого к АД напряжения  $U_1$ , но при этом будет снижаться вращающий момент двигателя и он может не запускаться при наличии нагрузки на валу.

У АД с контактными кольцами на время пуска можно вводить добавочные сопротивления в фазы ротора и ограничивать начальный пусковой ток. По мере разгона ротора добавочные сопротивления должны выводиться.

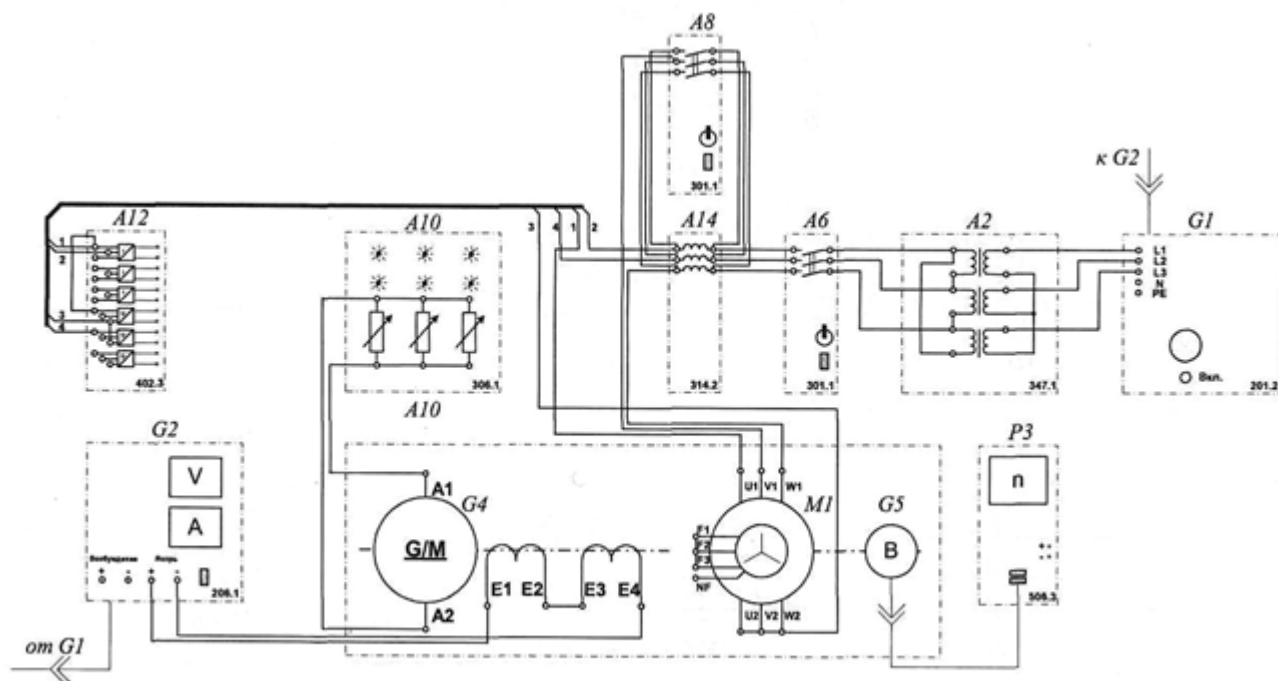


Рис. 1.1 Электрическая схема соединений (вариант 1, АД с короткозамкнутым ротором).

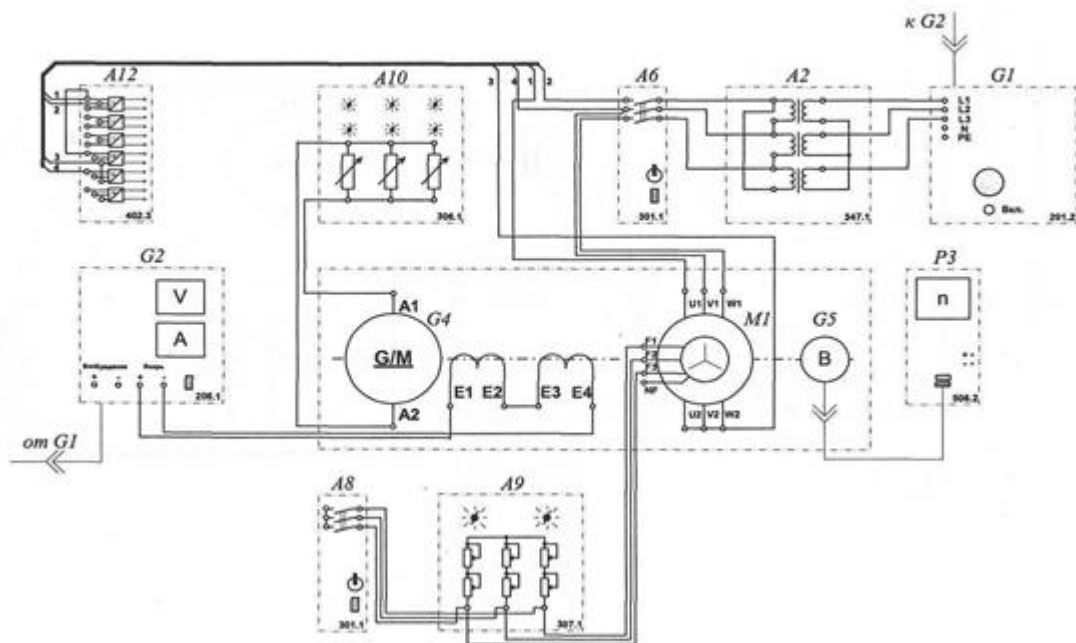


Рис. 1.2 Электрическая схема соединений (вариант 2, АД с фазным ротором)

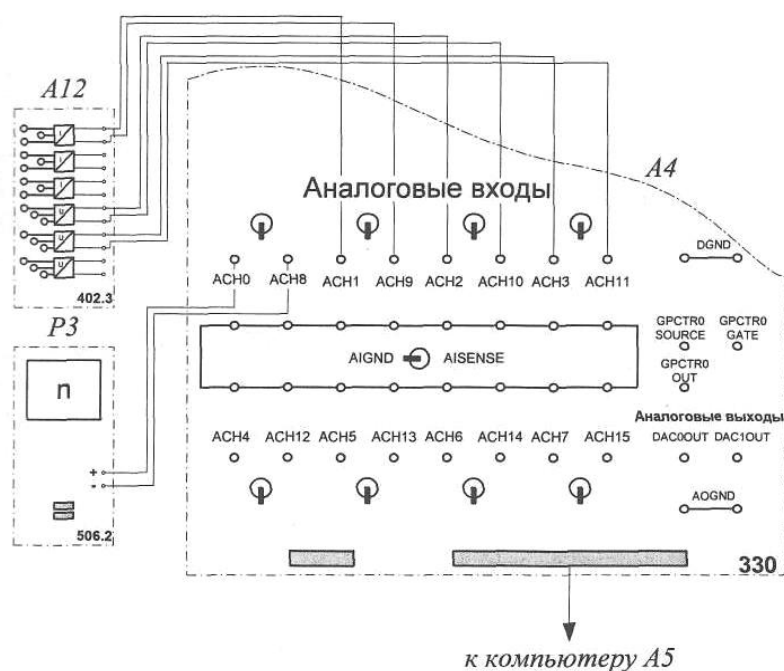


Рис. 1.3 Электрическая схема соединений (продолжение)

**Указание по технике безопасности:**

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

**Описание электрических схем соединений**

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания G2 двигателя постоянного тока используется для питания нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока G4, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением и выступающей в качестве нагрузочной машины.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Испытуемый асинхронный двигатель M1 получает питание через выключатель A6 и трехфазную трансформаторную группу A2 от трехфазного источника G1.

Выключатель A8 служит для закорачивания реактора A14 при реакторном пуске двигателя M1 с короткозамкнутым ротором либо - реостата A9 при двухступенчатом пуске двигателя M1 с фазным ротором.

Реостат А9 служит для вывода энергии скольжения при испытании двигателя М1 с фазным ротором.

Датчики тока и напряжения в блоке А12 обеспечивают гальваническую развязку силовой и измерительной цепей и преобразуют ток и напряжение статорной обмотки испытуемого двигателя М1 в пропорциональные им нормированные напряжения.

Через аналоговые входы АСН0-АСН8, АСН1-АСН9, АСН2-АСН10, АСН3-АСН11 коннектора А4 напряжения, пропорциональные току и напряжениям статорной обмотки, а также частоте вращения испытуемого двигателя М1, вводятся в компьютер А5.

### **Указания по проведению эксперимента**

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (Приложение Б).
- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений **(вариант 1 для пуска двигателя с короткозамкнутым ротором) / (вариант 2 для пуска двигателя с фазным ротором).**
- Переключатели режима работы источника G2 и выключателей А6, А8 установите в положение «РУЧН.».
- Установите в каждой фазе активной нагрузки А10 ее суммарную величину равную, например, 100%.
- Установите в каждой фазе реостата А9 сопротивление, например, 18 Ом (при пуске двигателя с фазным ротором).
- В трехфазной трансформаторной группе А2 переключателем установите желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора, например, 133 В.
- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А5 и запустите прикладную программу «Регистратор режимных параметров машины переменного тока».
- Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Вращением рукоятки на передней панели источника G2 установите напряжение, например, 100 В на его регулируемом выходе «ЯКОРЬ».

- Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» на экране компьютера.
- Нажмите последовательно кнопки «ВКЛ.» источника G2, выключателя A6 и спустя, например, 2 с выключателя A8 и затем не позднее, чем через 10 с, остановите сканирование данных регистратором нажатием на виртуальную кнопку «Остановить». В результате должен осуществиться двухступенчатый пуск нагруженного асинхронного двигателя M1 и должны записаться в компьютер данные о режимных параметрах на интервале пуска.
- Остановите запись процессов, нажав на виртуальную кнопку «Остановить».
- Нажмите кнопку «ОТКЛ.» источника G1.
- Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Используя возможности программы «Регистратор режимных параметров машины переменного тока», проанализируйте отображенные на мониторе компьютера механическую характеристику и временные зависимости тока статорной обмотки, электромагнитного момента, частоты вращения асинхронного двигателя при пуске его в ход.

### ***Контрольные вопросы***

1. Поясните устройство АД.
2. Поясните принцип действия АД.
3. Почему двигатель называется асинхронным?



**Снятие и определение характеристик холостого хода  $I_0=f(U)$ ,  $P_0=f(U)$  и  $\cos\varphi_0=f(U)$  трехфазного АД с короткозамкнутым ротором. Снятие и определение характеристик короткого замыкания  $I_K=f(U)$ ,  $P_K=f(U)$ ,  $Z_K=f(U)$  трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.**

### Основы теории:

Меньшая часть тока  $I_{0a}$  затрачивается на покрытие потерь холостого хода (магнитные и механические потери). Поэтому коэффициент мощности АД на холостом ходе достаточно низкий ( $\approx 0,1 \dots 0,3$ ), поэтому длительная работа АД в режиме  $x_1x$  не целесообразна.

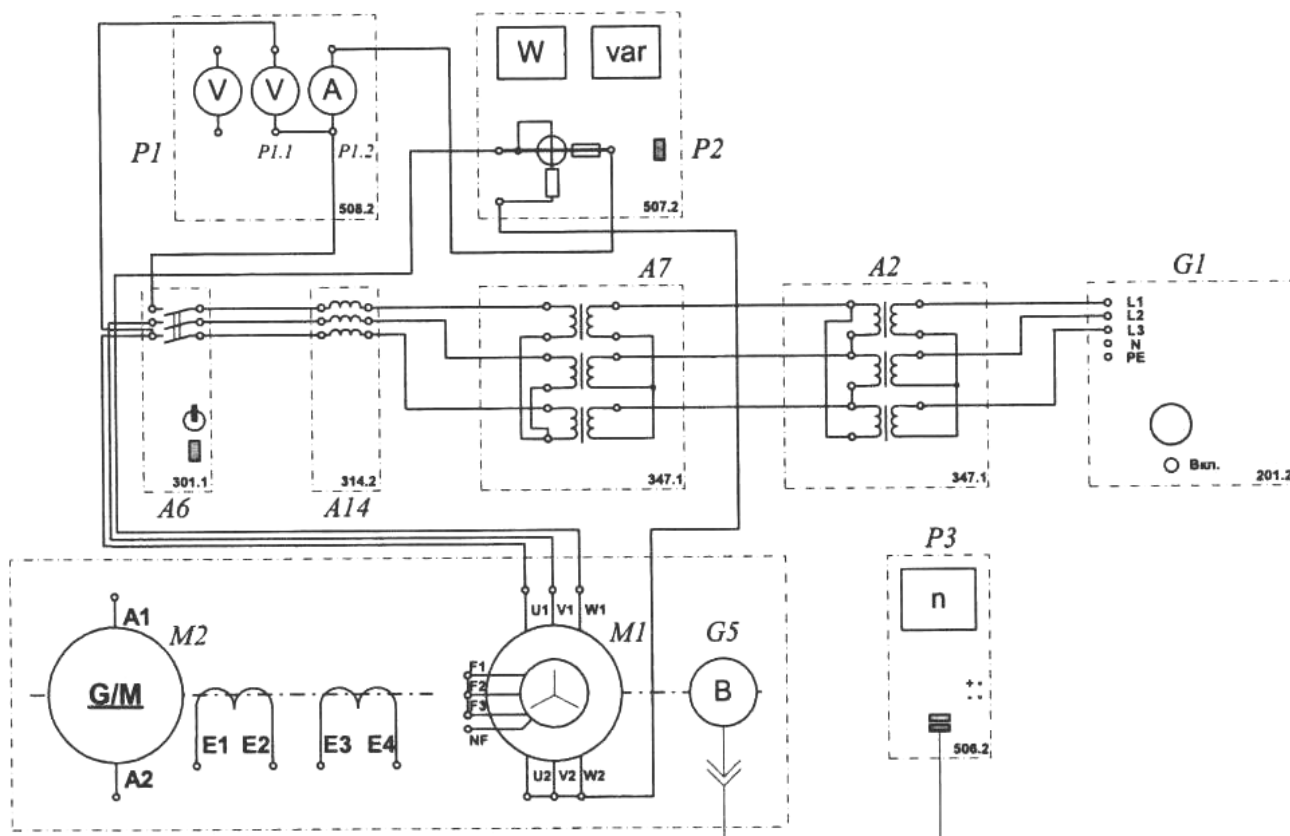


Рис.2.1 Электрическая схема соединений

### ***Указание по технике безопасности:***

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

### **Описание электрической схемы соединений**

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты».

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы» поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Испытуемый асинхронный двигатель M1 получает питание через выключатель A6 и трехфазные трансформаторные группы A2, A7 от трехфазного источника питания G1.

Линейный реактор A14 служит для дополнительного понижения напряжения, подводимого к испытуемому двигателю M1.

С помощью мультиметров блока P1 контролируются ток статорной обмотки и линейное напряжение испытуемого двигателя M1.

С помощью измерителя P2 контролируются активная и реактивная мощности, потребляемые одной фазой испытуемого двигателя M1.

### **Указания по проведению эксперимента**

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока.(приложение Б)
- Соедините гнезда защитного заземле  устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания G1
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Переключатели режима работы выключателей A6 и A8 установите в положение **"РУЧН."**.
- В трехфазных трансформаторных группах A2 и A7 установите номинальные вторичные напряжения трансформаторов 127 В и 127 В.
- Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Активизируйте мультиметры блока **P1**, задействованные в эксперименте.
- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Пустите двигатель M1 нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя A6.
- Меняя положение регулировочных рукояток трехфазных трансформатор-

Таблица 1.1

[illegible]

- $$Q_0 = 3 \cdot Q_{01}$$

*Таблица 1.2*

[illegible]

- $$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}}$$

Таблица 1.3

[illegible]

- При необходимости большей вариативности значений напряжения  $U$ , повторите эксперимент при закороченном линейном реакторе А14.

- Используя данные таблиц 10.2. и 10.3. постройте искомые характеристики холостого хода  $I_0=f(U)$ ,  $P_0=f(U)$ ,  $\cos\varphi_0 = f(U)$  трехфазного асинхронного двигателя с коротко замкнутым ротором.

*Снятие и определение характеристик короткого замыкания  $I_K=f(U)$ ,  $P_K=f(U)$ ,  $Z_K=f(U)$  трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором*

### **Описание электрической схемы соединений**

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Испытуемый асинхронный двигатель M1 получает питание через выключатель А6 и трехфазные трансформаторные группы А2, А7 от трехфазного источника питания G1.

С помощью мультиметров блока P1 контролируются ток и напряжение статорной обмотки испытуемого двигателя M1

С помощью измерителя P2 контролируются активная и реактивная мощности, потребляемые испытуемым двигателем M1.

### **Указания по проведению эксперимента**

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

- Снимите кожух закрывающий муфту, соединяющую вал машины постоянного тока M2 с валом двигателя M1, и закрепите на ней стопорное устройство.

- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока. (Приложение Б)

- Соедините гнезда защитного заземления  устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

- Переключатели режима работы источника G2 и выключателя А6 установите в положение "РУЧН"

- В трехфазных трансформаторных группах А2 и А7 переключателем установите номинальные вторичные напряжения трансформаторов 242 В.

- Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, находящихся в эксперименте.

- Активизируйте мультиметры блока P1, находящихся в эксперименте.

- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя A6 подключите двигатель M1 к электрической сети.
- Быстро (менее чем за 10 с) считайте и занесите в таблицу 2.3.1 показания вольтметра P1.1 (линейное напряжение P двигателя M1), амперметра P1.2 (ток  $I_k$  статорной обмотки двигателя M1), а также ваттметра измерителя P2 (активная  $P_{01}$  **МОЩНОСТЬ**) потребляемая одной фазой двигателя M1) и сразу после этого нажатием кнопки «ОТКЛ.» выключателя A6 отключите двигатель M1 от электрической сети.
- Повторите необходимое количество раз процедуру подключения двигателя M1 к электрической сети, считывания показаний измерительных приборов и отключения двигателя M1 от электрической сети при различных более низких номинальных вторичных напряжениях трансформаторов групп A2 и A7.

Таблица 1.4

[illegible]

- Отключите источник G1.
- Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- При необходимости большей вариативности значений линейного напряжения повторите эксперимент с соединением вторичных обмоток трансформаторов группы А7 по схеме «звезда».
- Используя данные таблицы 11.1, вычислите соответствующие напряжению  $U$  значения полной активной мощности  $P_K$ , потребляемой двигателем М1, и полного его сопротивления короткого замыкания  $Z_K$  по формулам

$$P_K = 3P_{K1};$$

$$\mathbf{Z}_K = \mathbf{U}/\mathbf{I}_K.$$

Полученные результаты занесите в таблицу 11.2

Таблица 1.4

[illegible]

- Используя данные таблиц 11.1 и 11.2 постройте искомые характеристики короткого замыкания  $I_k=f(U)$ ,  $P_k=f(U)$ ,  $Z_k=f(U)$  трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

### **Контрольные вопросы**

- **Вопросы и задания**

1. Поясните устройство АД.
2. Поясните принцип действия АД.
3. Почему двигатель называется асинхронным?

**Лабораторная работа № 12. Регулирование частоты вращения и особые режимы работы асинхронных машин. Определение механической характеристики  $n=f(M)$  трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым / фазным ротором. Определение рабочих характеристик  $I=f(P_2)$ ,  $P_1=f(P_2)$ ,  $s=f(P_2)$ ,  $\eta=f(P_2)$ ,  $\cos\varphi=f(P_2)$   $M=f(P_2)$  трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым / фазным ротором.**

**Цель работы:** провести эксперимент и построить механическую характеристику АД

### Основы теории:

Механическая характеристика АД называется зависимость частоты вращения ротора в зависимости от нагрузки на валу, т.е.  $n = f(M)$  при неизменном напряжении сети. Для короткозамкнутого трехфазного АД эта зависимость имеет примерный вид:

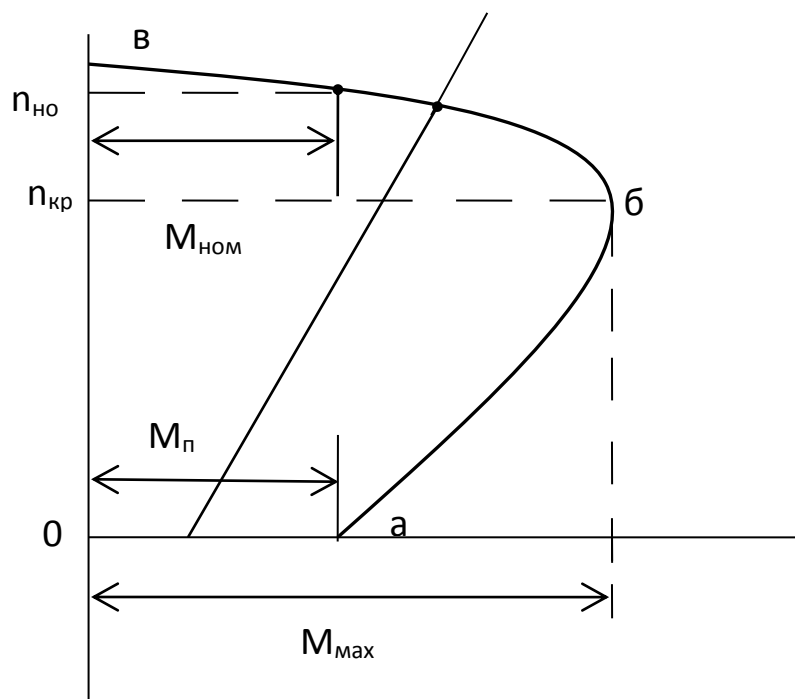


Рис.3.1 Механическая характеристика АД с короткозамкнутым ротором

Характеристика  $n = f(M)$  имеет два участка: аб и бв, из которых участок бв является зоной устойчивой работы АД, т.к. здесь  $\frac{dn}{dM} < 0$ , а область аб является зоной неустойчивой работы ( $\frac{dn}{dM} > 0$ ), т.е. эту зону АД может проходить при разгоне или остановке двигателя. При  $n = 0$  начало пуска, поэтому момент, развиваемый АД при его включении в сети, когда  $n$  еще равно нулю, называется начальным пусковым моментом  $M_п$ . Обычно  $M_п = (1,1...1,2)$

$M_{ном}$ . Если момент сопротивления нагрузки меньше  $M_{п}$ , то двигатель разгоняется, его  $M$  растет и при некоторой частоте вращения  $n_{кр}$  достигает максимального значения  $M_{max}$  и при дальнейшем разгоне  $M$  уменьшается до тех пор, пока не станет равным  $M_c$  – моменту сопротивления нагрузки.

У АД с контактными кольцами механическая характеристика зависит от величины добавочного сопротивления ротора  $R_d$ .

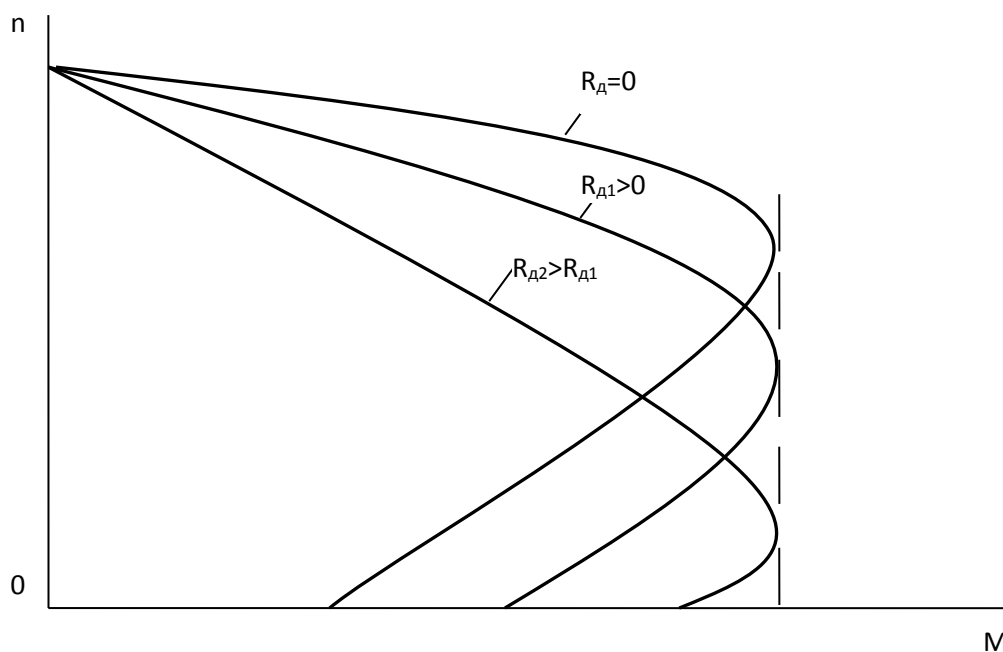


Рис. 3.2 Механические характеристики АД с фазным ротором с различными добавочными сопротивлениями в цепи ротора  $R_d$

Максимальный момент  $M_{max}$  АД не зависит от величины активного сопротивления цепи ротора:

$$M_{max} = \pm \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_1 \cdot x_k},$$

где  $p$  – число пар полюсов двигателя;

$m_1$  – число фаз статора,  $m_1 = 3$ ;

$\omega_1 = 2\pi f$  угловая частота вращения поля статора;

$x_k = x_1 + x_2'$  – реактивное сопротивление короткого замыкания АД;

$U_1$  – напряжение, подводимое к статору.

Таким образом, при введении  $R_d$  в цепь ротора АД с контактными кольцами пусковой ток уменьшается, а пусковой момент  $M_{п}$  растет за счет уменьшения угла сдвига между током и напряжением.



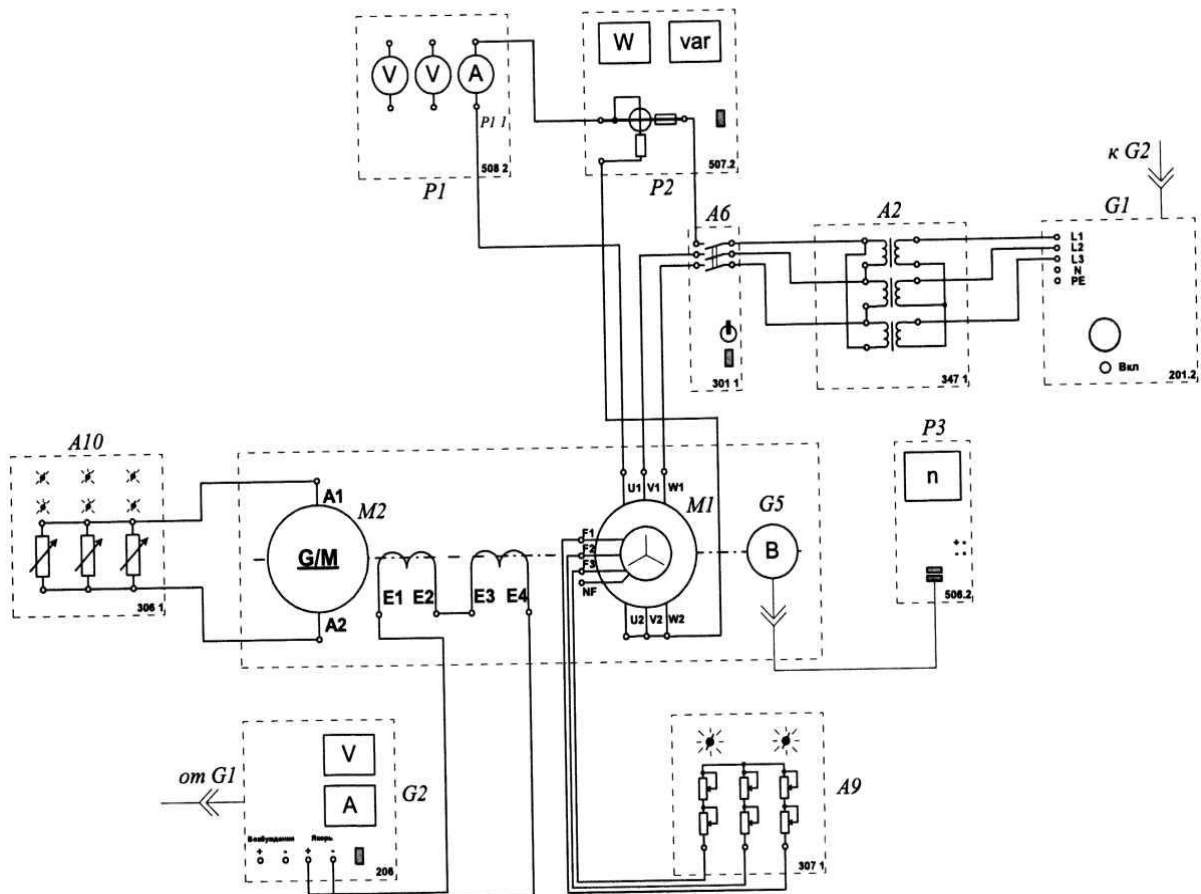


Рис.3.3 Электрическая схема соединений

**Указание по технике безопасности:**

## Описание электрической схемы соединений

Реостат А9 служит для вывода энергии скольжения при испытании двигателя М1 с фазным ротором.

Активная нагрузка А10 используется для нагружения генератора G4.

С помощью мультиметра блока Р1 контролируется ток статорной обмотки испытуемого двигателя М1.

С помощью измерителя Р2 контролируется активная мощность, потребляемая испытуемым двигателем М1.

### Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока. (Приложение Б)
- Соедините гнезда защитного заземления  устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Переключатели режима работы источника G2 и выключателя А6 установите в положение "РУЧН".
- Регулировочные рукоятки реостата А9 поверните против часовой стрелки до упора (*при снятии механической характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором*).
- Установите суммарное сопротивление каждой фазы реостата А9, например, 20 Ом (*при снятии механической характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором*).
- Регулировочную рукоятку источника G2 поверните до упора против часовой стрелки, а регулировочные рукоятки активной нагрузки А10 - по часовой стрелке.
- Установите переключателем в трехфазной трансформаторной группе А2 номинальные напряжения вторичных обмоток трансформаторов, например, 127В.
- Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Активизируйте мультиметры блока **Р1**, задействованные в эксперименте.

- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Пустите двигатель M1 нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя A6.
- Нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, изменяйте ток **I** статорной обмотки двигателя M1 и заносите показания амперметра P1.1 (ток **I**), ваттметра измерителя мощностей P2 (активная мощность **P** фазы двигателя M1) и указателя P3 (частота вращения **n** двигателя M1) в таблицу 11.1.

Таблица 1.1.

|                            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b>I, А</b>                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>P, Вт</b>               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>n, мин<sup>-1</sup></b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- По завершении эксперимента отключите выключатель A6 и источник G1.
- Выключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Вычислите электромагнитный момент **M** двигателя M1 для каждого значения тока **I** из табл. 11.1. по формуле:

$$M = \frac{3}{50\pi} (P - 21 \cdot I^2), \text{ Н} \cdot \text{м}$$

и занесите его в таблицу 12.2.

Таблица 1.2.

|                            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b>M, Нм</b>               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>n, мин<sup>-1</sup></b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- Используя данные таблицы 12.2. постройте искомую механическую характеристику **n=f(M)** трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым / фазным ротором.

Определение рабочих характеристик  $I=f(P_2)$ ,  $P_1=f(P_2)$ ,  $s=f(P_2)$ ,  $\eta=f(P_2)$ ,  $\cos\varphi=f(P_2)$   
 $M=f(P_2)$  трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым / фазным ротором

### Описание электрической схемы соединений

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты. Источник питания G2 двигателя постоянного тока используется для питания нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока G4, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением и выступающей в качестве нагрузочной машины. Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Испытуемый асинхронный двигатель M1 получает питание через выключатель A6 и трехфазную трансформаторную группу A2 от трехфазного источника питания G1.

Реостат A9 служит для вывода энергии скольжения при испытании двигателя M1 с фазным ротором.

Активная нагрузка A10 используется для нагружения генератора G4.

С помощью мультиметров блока P1 контролируются ток статорной обмотки испытуемого двигателя M1, ток и напряжение якорной обмотки генератора G4.

С помощью измерителя P2 контролируются активная и реактивная мощности, потребляемые испытуемым двигателем M1.

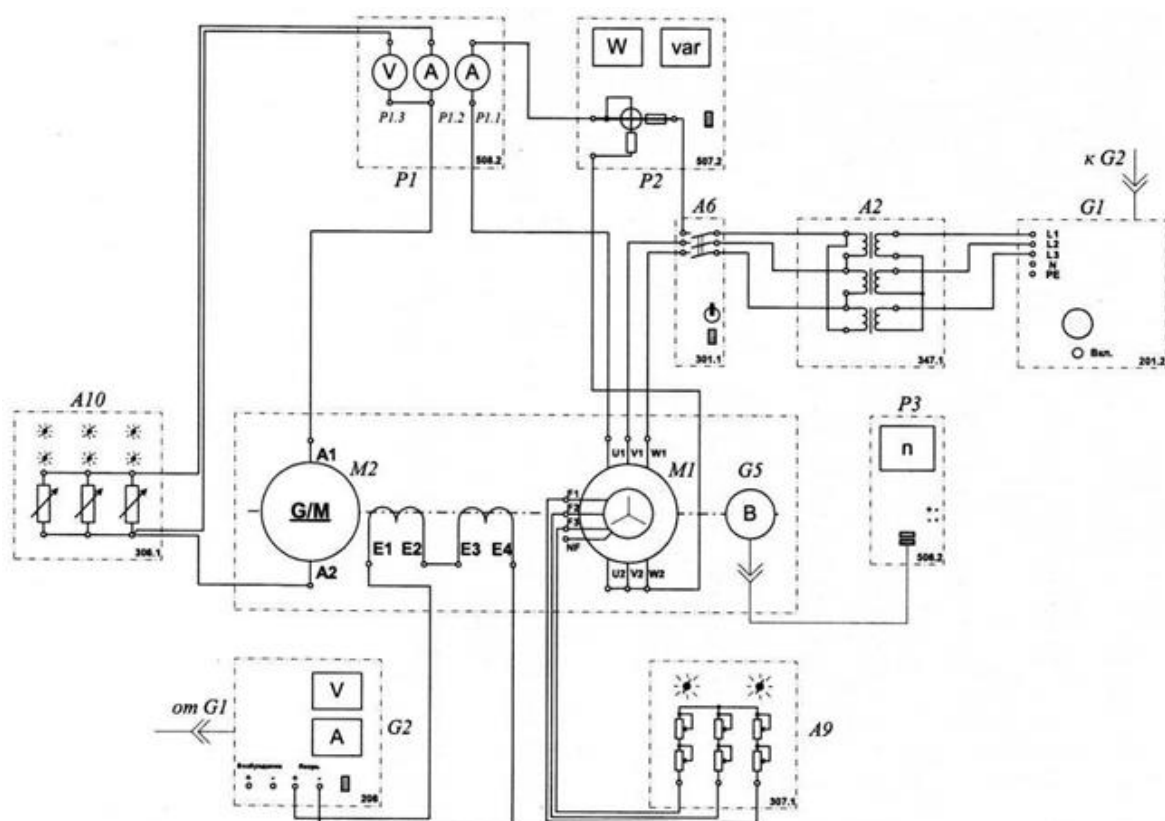


Рис.3.4 Электрическая схема соединений

## Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока. (Приложение Б)
- Соедините гнезда защитного заземления «» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Переключатели режима работы источника G2 и выключателя А6 установите в положение "РУЧН."
- Регулировочные рукоятки реостата А9 поверните против часовой стрелки до упора (*при снятии механической характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором*).
- Установите суммарное сопротивление каждой фазы реостата А9, например, 20 Ом (*при снятии механической характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором*).
- Регулировочную рукоятку источника G2 поверните до упора против часовой стрелки, а регулировочные рукоятки активной нагрузки А10 - по часовой стрелке.
- Установите переключателем в трехфазной трансформаторной группе А2 номинальные напряжения вторичных обмоток трансформаторов, например, 127В.
- Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.
- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Пустите двигатель М1 нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя А6.
- Нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, изменяйте ток **I** статорной обмотки двигателя М1 и заносите показания амперметра Р1.1 (ток **I**), ваттметра и варметра измерителя мощностей Р2 (активная **P<sub>11</sub>** и реактивная **Q<sub>11</sub>** мощности фазы двигателя М1), указателя Р3 (частота вращения **n** двигателя М1), амперметра Р1.2 и вольтметра Р1.3 (ток **I<sub>a</sub>** и напряжение **U<sub>a</sub>** якорной обмотки генератора G4) в таблицу 12.1.

Таблица 3.3.

|                                 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b>I, A</b>                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>P<sub>11</sub>,<br/>Вт</b>   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>Q<sub>11</sub>,<br/>В·Ар</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>n,<br/>мин<sup>-1</sup></b>  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>I<sub>a</sub>, A</b>         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>U<sub>a</sub>, В</b>         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- По завершении эксперимента отключите выключатель А6 и источник G1.
- Выключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Используя данные таблицы 12.1, вычислите для каждого значения тока **I** значения, полезной активной мощности **P<sub>2</sub>**, полной потребляемой из сети активной мощности **P<sub>1</sub>** полезного механического момента **M**, коэффициента мощности **cosφ**, скольжения **s** и коэффициента полезного действия **η** асинхронного двигателя с короткозамкнутым / фазным ротором по формулам:

$$P_2 = I_a \cdot U_a;$$

$$P_1 = 3P_{11};$$

$$M = \frac{3}{50\pi} (P_{11} - 21I^2);$$

$$\cos\varphi = \frac{P_{11}}{\sqrt{P_{11}^2 + Q_{11}^2}};$$

$$s = \left(1 - \frac{n}{1500}\right) \cdot 100;$$

$$\eta = \frac{P_2}{3P_{11}} 100,$$

и занесите полученные результаты в таблицу 12.2

Таблица 3.4

|                              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b>I, A</b>                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>P<sub>2</sub>,<br/>Вт</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>P<sub>1</sub>,<br/>Вт</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>M,<br/>Н·м</b>            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>cos φ</b>                 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>s,<br/>%</b>              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>η, %</b>                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

• Используя данные таблицы 13.2, постройте искомые рабочие характеристики  $I=f(P_2)$ ,  $P_1=f(P_2)$ ,  $s=f(P_2)$ ,  $\eta=f(P_2)$ ,  $\cos\varphi=f(P_2)$ ,  $M=f(P_2)$  трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым / фазным ротором.

### Контрольные вопросы

1. Перечислите условия получения вращающегося магнитного поля статора.
2. Приведите вывод суммарного магнитного поля статора в функции линейной координаты круга статора и времени.
3. Докажите поведение суммарного поля статора как бегущей вдоль круга статора волны.
4. Как влияет на частоту вращения магнитного поля статора число пар полюсов его обмоток?

**Лабораторная работа № 13. Характеристики синхронного генератора и параллельная работа синхронных машин. Снятие характеристики холостого хода  $E_o = f(I_b)$  трехфазного синхронного генератора. Снятие характеристики короткого замыкания  $I_{1к} = f(I_b)$  трехфазного синхронного генератора.**

**Цель работы:** Определить характеристики холостого хода  $E_o = f(I_b)$  трехфазного синхронного генератора. Определить характеристики короткого замыкания  $I_{1к} = f(I_b)$  трехфазного синхронного генератора

**Основы теории:**

**Устройство СГ.** Синхронный генератор является электрической машиной переменного тока, предназначенный для выработки системы трехфазных напряжений. СГ состоит из статора и ротора (рис.4.1,а). На статоре размещены три обмотки, которые выполнены по всем правилам, по которым выполняются обмотки статора АД: угол сдвига в пространстве между фазными обмотками составляет  $120^\circ/p_{\Pi}$ , график магнитного поля каждой обмотки имеет синусоидальную форму. Далее, с целью упрощения изложения материала, примем число пар полюсов обмотки статора равным единице ( $p_{\Pi}=1$ ) и тогда между обмотками пространственный угол составит  $120^\circ$ . Назначение статора – с его обмоток снимается выработанные СГ трехфазные напряжения.

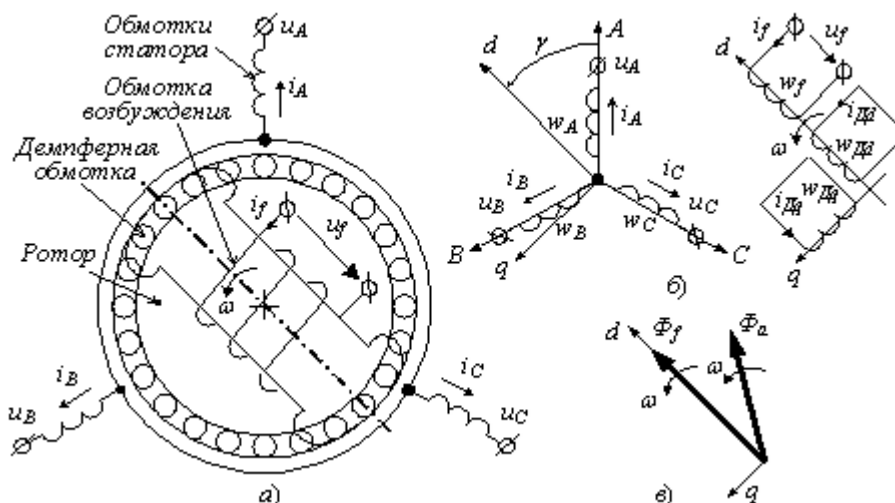


Рисунок 4.1 Синхронный генератор (СГ): устройство (а), схема обмоток(б) и потоков обмотки возбуждения  $\Phi_f$  и реакции якоря  $\Phi_a$  (в)

На роторе, который приводится во вращение сторонним двигателем, например, дизелем, содержатся две обмотки – возбуждения (индекс "f" в обозначениях сигналов) и демпферная (индекс "Д" в обозначениях сигналов). Обмотка возбуждения располагается на полюсных наконечниках ротора, концы ее выведены на кольца, установленные на валу ротора,



а к кольцам прилегают щетки. К щеткам подведено постоянное напряжение  $u_f$  возбуждения. Назначением обмотки возбуждения состоит в создании постоянного магнитного поля - потока  $\Phi_f$  (рис.4.1,б,в). Демпферная обмотка является короткозамкнутой обмоткой из стержней, уложенных в пазы на периферии ротора. По конструкции она ничем не отличается от короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя. Назначением демпферной обмотки является обеспечение устойчивости работы СГ при скачкообразных изменениях электрической нагрузки СГ.

*Принцип действия СГ.* Магнитное поле обмотки возбуждения (поток  $\Phi_f$ ) вращающегося ротора последовательно пересекает контура фазных обмоток статора и в них индуцируется система трехфазных э.д.с.

$$\begin{cases} e_A = E_m \sin(\omega t), \\ e_B = E_m \sin(\omega t - 2\pi / 3), \\ e_C = E_m \sin(\omega t - 4\pi / 3), \end{cases}$$

причем частота э.д.с. совпадает с частотой вращения ротора СГ (при  $p=1$ ).

Концы статорной обмотки выведены на клеммник (борно – коробка выводов). Эти э.д.с. снимаются с выводов статорной обмотки. При подключении нагрузки к выводам по обмоткам статора потекут фазные токи  $i_A$ ,  $i_B$  и  $i_C$ . Эти токи создадут во внутренних сопротивлениях обмоток статора (сопротивления состоит из активного сопротивления  $R$  проводников обмоток и индуктивного сопротивления рассеяния  $x_p$ ) падения напряжения. За вычетом этих падений напряжений из э.д.с. на выводах образуется три фазных напряжения  $u_A$ ,  $u_B$  и  $u_C$ . Этим завершаются пояснения того, как СГ используется по назначению.

При работе СГ под нагрузкой возникает побочный эффект – реакция якоря, суть которой состоит в следующем. Системой трехфазных токов  $i_A$ ,  $i_B$  и  $i_C$  в статоре создается вращающееся магнитное поле  $\Phi_a$ . Это поле вращается синхронно с основным магнитным полем  $\Phi_f$  и индуцирует в обмотках статора свои собственные э.д.с. Нагрузка, подключаемая к СГ, преимущественно активно-индуктивная - это АД, трансформаторы. При такой нагрузке все фазные э.д.с.  $e_A$ ,  $e_B$  и  $e_C$  существенно уменьшаются. Описанное явление влияния магнитного поля статора  $\Phi_a$  на магнитное поле обмотки возбуждения  $\Phi_f$  и, в конечном счете – к уменьшению э.д.с., называется реакцией якоря.

Якорем у СГ называется статор. Названием "якорь" подчеркивается аналогия обмоток статора СГ с обмоткой якоря генератора постоянного тока в том смысле, что именно в обмотке якоря индуцируется э.д.с. Названием "статор" подчеркивается принадлежность обмоток неподвижной части СГ.

*Назначение демпферной обмотки.* В установившемся режиме работы СГ, когда отдаваемая им активная мощность равна активной мощности, потребляемой нагрузкой,

действующие значения (уровни) напряжений  $U_A$ ,  $U_B$  и  $U_C$  и их частота стабильны. Стабильность частоты означает, что вращающий момент дизеля в точности равен моменту сопротивления СГ. Если, например, к СГ подключить нагрузку, которая будет потреблять активную мощность, то баланс моментов дизеля и СГ нарушится и частота вращения  $\omega$  СГ начнет снижаться и будет понижаться частота выходного напряжения СГ. Для неавтономно работающего СГ это является аварийной ситуацией и важно не допустить снижения частоты вращения ротора до тех пор, пока вращающий момент дизеля поднимется. Как только ротор начнет снижать частоту вращения его демпферная обмотка начнет пересекаться магнитным полем статора  $\Phi_a$  и на ротор начнет действовать электромагнитная сила и момент по тому же принципу направлен в ту же сторону, в какую направлен вращающий момент дизеля, и он предотвратит снижение частоты вращения СГ после подключения к нему электрической нагрузки. При отключении электрической нагрузки СГ его ротор начнет ускоряться и демпферная обмотка создаст тормозной момент. Описанная способность демпферной обмотки гасить быстрые изменения частоты вращения ротора и дало ей название – *демпферная*.

Схемы соединения обмоток СГ и их оси показаны на рис.4.1,б. Оси  $A$ ,  $B$  и  $C$  привязаны к соответствующим обмоткам статора и неподвижны в пространстве. С ротором связывают систему ортогональных осей  $d$ - $q$ , причем ось  $d$  – *продольная* и направлена по оси обмотки возбуждения, а ось  $q$  – *поперечная*. При вращении ротора меняется угол  $\gamma$  между осями  $A$  и  $d$  по зависимости  $\gamma = \omega t$ .

#### **Указание по технике безопасности:**

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

#### **Описание электрической схемы соединений**

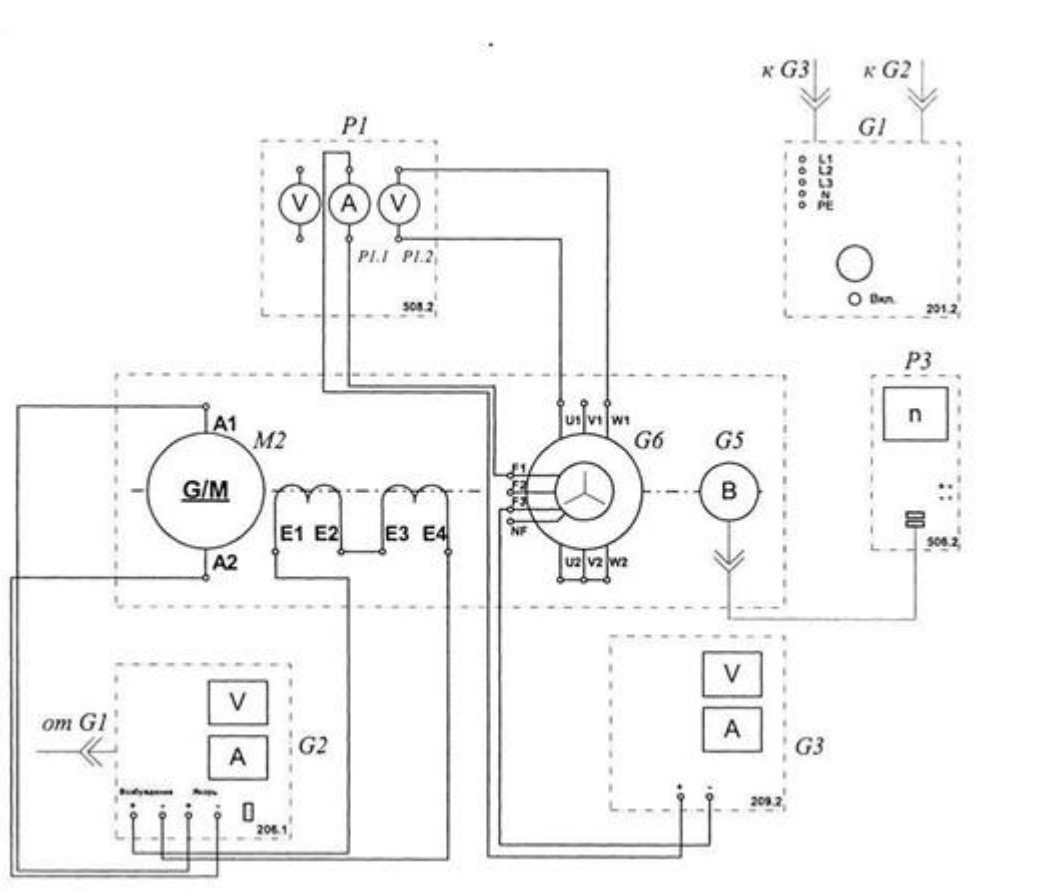
Источник **G1** - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока **G2** используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока **M2**, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением.

Возбудитель **G3** служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока **G6**, работающей в режиме синхронного двигателя.

Преобразователь угловых перемещений **G5** генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения **P3** электромашинного агрегата.

С помощью мультиметров блока **P1** контролируются ток возбуждения  $I_b$  и Э.Д.С.  $E_o$  испытуемого генератора **G6**.



### 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 "PE" трехфазного источника питания G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений. Переключатели режима работы источника G2 и возбуждателя G3 установите в положение «РУЧН.».
- Регулировочные рукоятки источника G2 и возбуждателя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.

- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, разгоните двигатель M2 (генератор G6) до частоты  $1500 \text{ мин}^{-1}$  и поддерживайте ее в ходе эксперимента неизменной.
- Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3.
- Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, изменяйте ток возбуждения  $I_b$  генератора G6 в диапазоне  $0 \dots 2 \text{ А}$  и заносите показания амперметра P1.1 (ток  $I_b$ ) и вольтметра P 1.2 (Э.Д.С.  $E_0$  синхронного генератора G6) в таблицу 1.1.

Таблица 1..1.

| $I_b, \text{ А}$     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $E_{E_0}, \text{ В}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- По завершении эксперимента первоначально у возбудителя G3, а затем и у источника G2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку "ОТКЛ." и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите источник G1 нажатием на кнопку - гриб, и последующим отключением ключа - выключателя. Отключите выключатели "СЕТЬ" блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.
- Используя результаты табл. 1.1, постройте искомую характеристику холостого хода  $E_0 = f(I_b)$  трехфазного синхронного генератора.

*Снятие характеристики короткого замыкания  $I_{I_k} = f(I_b)$  трехфазного синхронного генератора*

### Описание электрической схемы соединений

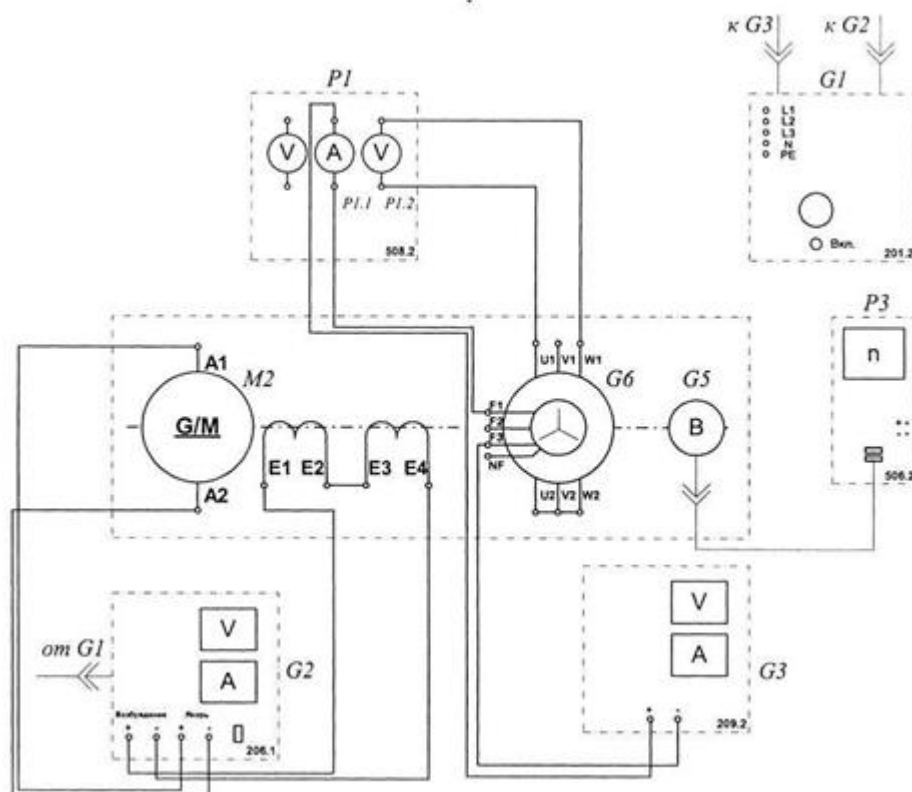
Источник **G1** - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока **G2** используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока **M2**, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением.

Возбудитель **G3** служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока **G6**, работающей в режиме синхронного двигателя.

Преобразователь угловых перемещений **G5** генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения **P3** электромашинного агрегата.

С помощью мультиметров блока **P1** контролируются ток возбуждения  $I_B$  и ток  $I_k$  статорной обмотки испытуемого синхронного генератора **G6**.



### Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (Приложение Б)
- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений. Переключатели режима работы источника G2 и возбудителя G3 установите в положение "РУЧН."
- Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.

- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, разгоните двигатель M2 (генератор G6) до частоты  $1500 \text{ мин}^{-1}$  и поддерживайте ее в ходе эксперимента неизменной.
- Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3.
- Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, изменяйте ток возбуждения  $I_b$  генератора G6 в диапазоне  $0 \dots 2 \text{ А}$  и заносите показания амперметра P1.1 (ток  $I_b$ ) и вольтметра P 1.2 (Э.Д.С.  $I_{1к}$  синхронного генератора G6) в таблицу 1.2.

Таблица 1.2.

|                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $I_b,$<br><b>А</b>    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I_{1к},$<br><b>В</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- По завершении эксперимента первоначально у возбудителя G3, а затем и у источника G2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку "ОТКЛ." и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите источник G1 нажатием на кнопку - гриб, и последующим отключением ключа - выключателя. Отключите выключатели "СЕТЬ" блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.
- Используя результаты табл. 1.2, постройте искомую характеристику холостого хода  $I_{1к} = f(I_b)$  трехфазного синхронного генератора.

### Контрольные вопросы

1. Поясните устройство СГ.
2. Поясните принцип действия СГ.
3. Что такое реакция якоря для СГ?
4. Поясните назначение демпферной обмотки.

**Лабораторная работа № 14. Характеристики синхронного генератора и параллельная работа синхронных машин. Снятие внешней  $U = f(I_1)$ , регулировочной  $I_b = f(I_1)$  и нагрузочной характеристик трехфазного синхронного генератора в автономном режиме.**

**Цель работы:** Определить внешние  $U = f(I_1)$ , регулировочные  $I_b = f(I_1)$  и нагрузочные характеристики трехфазного синхронного генератора в автономном режиме

**Основная часть:**

Внешняя характеристика определяет зависимость  $U = f(I)$  при  $I_f = \text{const}$ ,  $\cos \varphi = \text{const}$ ,  $f = f_{\text{ном}}$  и показывает, как изменяется напряжение СГ  $U$  при изменении тока нагрузки  $I$  и неизменном токе возбуждения. Так как ток возбуждения и частота вращения СГ постоянны, то будет постоянной э.д.с.  $E$  СГ.

Для определения вида графика внешней характеристики используем построения по упрощенной векторной диаграмме неявнополюсного СГ. Рассмотрим работу СГ на активную ( $R$ ), активно-индуктивную ( $RL$ ) и активно-емкостную ( $RC$ ) нагрузку (рис.5.1).

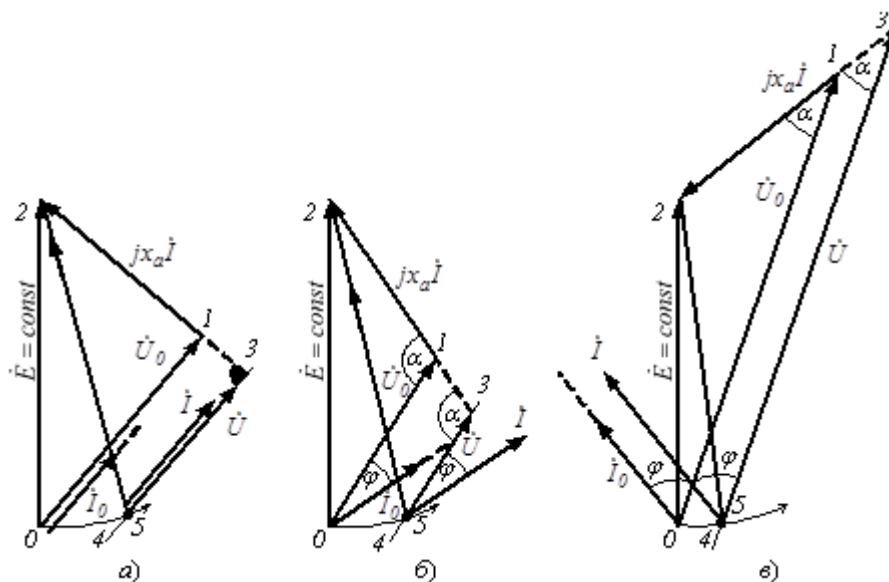


Рисунок 5.1- Векторные диаграммы для расчета внешних характеристик при активной (а), активно-индуктивности (б) и активно-емкостной (в) нагрузкой

Нагрузка СГ активная, между током и напряжением нагрузки сдвиг по фазе нулевой –  $\varphi = 0$ .

Примем вначале ток нагрузки равным  $I_0$  и напряжение на нагрузке, найденное из диаграммы 0-1-2, равняется  $U_0$ . Пусть ток в нагрузке увеличился до  $I$  (на диаграмме прирост тока показан пунктирной линией на продолжении вектора  $I_0$ ). Тогда падение напряжения  $jx_a I$  увеличится, точка 1, ограничивающая длину этого вектора, переместится в точку 3. Новый

вектор напряжения  $U$  будет входить в точку 3 под углом  $90^\circ$  по направлению прямой линии 3-4, так как с вектором тока  $i$  при любой величине тока  $I$  вектор напряжения  $\dot{U}$  будет параллелен (нагрузка активная), вектор  $jx_a i$  будет опережать на  $90^\circ$  и, следовательно, между векторами  $\dot{U}$  и  $jx_a i$  будут постоянные  $90^\circ$ . Повернем вектор э.д.с.  $E$  против часовой стрелки относительно точки 2 до его пересечения с линией 3-4. Точку пересечения обозначим как 5. Отрезок 3-5 линии 3-4 будет вектором напряжения  $U$ . Как следует из построений,  $U < U_0$ . Значит, при активной нагрузке с увеличением тока напряжение на ней уменьшается.

*Нагрузка СГ активно-индуктивная, напряжение на нагрузке опережает ток в ней на угол  $\varphi > 0$  (рис.5.1,б).*

Построения такие же, как и для активной нагрузки. При активно-индуктивной нагрузке с увеличением тока напряжение на ней уменьшается интенсивнее, чем при активной нагрузке (так как  $\alpha > 90^\circ$ ).

*Нагрузка СГ активно-емкостная, напряжение на нагрузке отстает от тока в ней на угол  $\varphi < 0$  (рис.5.1,в).*

Построения такие же, как и для активной нагрузки. При активно-емкостной нагрузке с увеличением тока напряжение на ней увеличивается.

Из общего анализа векторных диаграмм на рис.5.1 следует:

- при холостом ходе, когда ток  $I=0$ , напряжения  $U$  на выводах СГ одинаковые и равны э.д.с.  $E$  холостого хода;

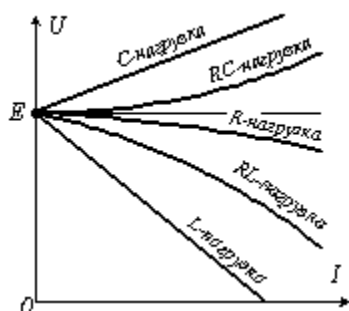


Рисунок 5.2 –Внешние характеристики СГ

- при одинаковых токах  $I$  в нагрузках, напряжение  $U$  на активной нагрузке меньше  $E$ , еще меньше  $U$  при активно-индуктивной нагрузке, а напряжение  $U$  на активно-емкостной нагрузке может превышать  $E$  (при достаточном преобладании емкостной составляющей полного сопротивления над активной составляющей);

- с увеличением тока  $I$  напряжение  $U$  на активной и активно-индуктивной нагрузке продолжает уменьшаться, а напряжение  $U$  на активно-емкостной нагрузке продолжает повышаться.

Графики внешних характеристик СГ приведены на рис.5.2.

#### **Указание по технике безопасности:**

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А



## Описание электрической схемы соединений

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

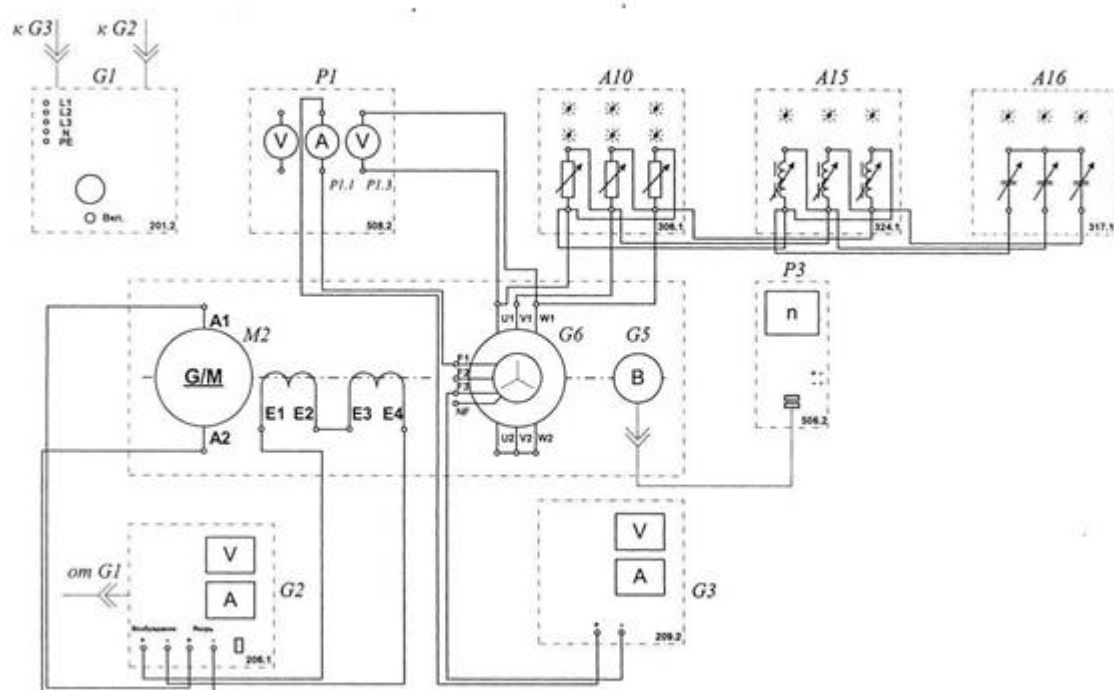
Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока M2, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока G6, работающей в режиме синхронного генератора.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Нагрузки - активная A10, индуктивная A15 и емкостная A16 используются для нагружения синхронного генератора G6.

С помощью мультиметров блока P1 контролируются ток возбуждения  $I_v$ , ток I статорной обмотки и линейное напряжение U испытуемого синхронного генератора G6.



## Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (Приложение Б).

- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Переключатели режима работы источника G2 и возбудителя G3 установите в положение "РУЧН."
- Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- Установите регулировочные рукоятки активной нагрузки A10 (индуктивной нагрузки A15 / емкостной нагрузки A17) в положение "0%".
- Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, разгоните двигатель M2 (генератор G6) до частоты  $1500 \text{ мин}^{-1}$  и поддерживайте ее в ходе эксперимента неизменной.
- Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3.
- Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, установите ток возбуждения  $I_b$ , при котором междуфазное напряжение U генератора G6 будет равно 230 В.
- Перемещая синфазно регулировочные рукоятки активной нагрузки A10 (индуктивной нагрузки A15 / емкостной нагрузки A16), изменяйте ток I статорной обмотки генератора G6 в диапазоне 0...0,25 А и заносите показания амперметра P1.2 (ток I) и вольтметра P1.3 (напряжение U) в таблицу 1.1.

*Таблица 1.1*

|             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b>I, А</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>U, В</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- Верните регулировочные рукоятки активной нагрузки A1 (индуктивной нагрузки A15 / емкостной нагрузки A17) в положение "0%".
- Синфазно поворачивая регулировочные рукоятки активной нагрузки A1 (индуктивной нагрузки A15 / емкостной нагрузки A16) и поддерживая напряжение U генератора G4 равным 230 В, путем регулирования его тока возбуждения  $I_b$ , изменяй-

те ток I статорной обмотки генератора G6 в диапазоне 0..0,25 А и заносите показания амперметров P1.1 (ток I<sub>B</sub>), P1.2 (ток I) в таблицу 1.2.

*Таблица 1.2*

[illegible]

- Верните регулировочные рукоятки активной нагрузки A1 (индуктивной нагрузки A15 / емкостной нагрузки A17) в положение "0%".
- Соедините фазы емкостной нагрузки по схеме «треугольник».
- Поверните регулировочную рукоятку возбуждателя G3 против часовой стрелки до упора.
- Закоротите активную нагрузку A1 (индуктивную нагрузку A15 / емкостную нагрузку A17).
- Увеличивая ток возбуждения  $I_b$  генератора G3, установите ток I статорной обмотки генератора G6 равным, например, 0,05 А и занесите показания амперметра P1.1 (ток  $I_b$ ) и вольтметра P1.3 (напряжение U) в таблицу 1.3
- Поверните регулировочную рукоятку возбуждателя G3 против часовой стрелки до упора.
- Раскоротите активную нагрузку A1 (индуктивную нагрузку A15 / емкостную нагрузку A17).
- Установите регулировочные рукоятки активной нагрузки A1 (индуктивной нагрузки A15 / емкостной нагрузки A17) в положение "100%".
- Синфазно поворачивая против часовой стрелки регулировочные рукоятки активной нагрузки A10 (индуктивной нагрузки A15 / емкостной нагрузки A16) и поддерживая неизменным, например, равным 0,05 А ток I статорной обмотки генератора G6 путем регулирования его тока возбуждения  $I_b$ , изменяйте напряжение U статорной обмотки генератора G6 (не превышая значения 250 В) и заносите показания амперметра P1.1 (ток  $I_b$ ) и вольтметра P1.3 (напряжение U) в таблицу 1.3

Таблица 1.3

[illegible]

- По завершении эксперимента первоначально у возбuditеля G3, а затем и у источника G2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку "ОТКЛ." и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите источник G1 нажатием на кнопку - гриб, и последующим отключением ключа - выключателя. Отключите выключатели "СЕТЬ" блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.

- Используя результаты таблиц 1.1... 1.3, постройте искомые характеристики трехфазного синхронного генератора G6 при активном (индуктивном / емкостном) характере его нагрузки:

- внешнюю  $U = f(I)$  при  $n = \text{const}$ ,  $I_b = \text{const}$  (табл. 1.1.);
- регулировочную  $I_b = f(I)$  при  $n = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$  (табл. 1.2.);
- нагрузочную  $U = f(I_b)$  при  $n = \text{const}$ ,  $I = \text{const}$  (табл. 1.3.).

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните построения для расчета внешней характеристики при активной нагрузке.
2. Поясните построения для расчета внешней характеристики при активно-индуктивной нагрузке.
3. Поясните построения для расчета внешней характеристики при активно-емкостной нагрузке.
4. Поясните внешний вид внешних характеристик СГ.

**Лабораторная работа № 15. Характеристики синхронного генератора и параллельная работа синхронных машин. Подключение к сети трехфазного синхронного генератора методом точной синхронизации.**

**Цель работы:** Подключить к сети трехфазный синхронный генератор методом точной синхронизации

**Основы теории:**

В сетях электроснабжения переменного тока устанавливается не менее двух СГ, что дает следующие преимущества (в сравнении с использованием для электропитания только одного СГ):

1). Повышается надежность электроснабжения за счет резервирования при использовании более одного СГ.

2). Обеспечивается экономичная работа параллельно работающих СГ, в которой нагрузка СГ может поддерживаться на уровне, обеспечивающем максимальный к.п.д. Так, если нагрузка двух параллельно работающих СГ составляет менее половины, то при выводе из работы одного СГ, оставшийся в работе СГ загрузится выше половины, а это всегда приводит к повышению к.п.д. СГ.

3). Исключается перегрузка СГ. Так, если работающие СГ нагружены токами сверх номинальных, то введением дополнительно в работу еще одного СГ, который возьмет на себя часть тока нагрузки, другие СГ разгружаются.

Различают параллельную работу СГ:

- на сеть бесконечной мощности;
- соизмеримой между собой мощности.

Существуют три способа введения СГ для работы в параллель с сетью (уже работающими генераторами):

- 1) точная синхронизация;
- 2) грубая синхронизация;
- 3) самосинхронизация.

Подключаемый к сети СГ работает вхолостую и, поэтому напряжение на выводах СГ равно его э.д.с.  $E$ .

**Способ точной синхронизации.** Схема способа точной синхронизации приведена на рис.6.1,а). СГ включает в сеть возбужденным. Перед подключением СГ к сети должны быть выполнены три условия:

1. Должно быть равенство действующих значений э.д.с.  $E$  генератора и напряже-

ния  $U$  сети (контролируются вольтметрами).

2. Должно быть равенство частот э.д.с.  $E$  генератора и напряжения  $U$  сети:  $f=f_c$  (контролируются частотомерами)

3. Должно быть равенство электрических фаз э.д.с.  $E$  генератора и напряжения  $U$  сети:  $\alpha=\alpha_c$  или, как это общепринято, разность фаз  $\Delta\alpha=\alpha-\alpha_c$  должна быть равна нулю (контролируются синхроскопом).

Перечисленные условия обеспечивают идеальную синхронизацию, при проведении которой уравнивающего тока  $I_{ур}$  в обмотках подключаемого СГ и на шинах сети не возникает. Естественно, точно выполнить перечисленные условия не представляется возможным и, поэтому, возникают уравнивающие токи. Синхронизация считается точной, если по амперметру, включенному в цепь статора, бросок уравнивающего тока не превысил  $(0,7...0,8)I_{ном}$ .

При настройке технических средств синхронизации, необходимо учитывать то, что величина уравнивающего тока наиболее чувствительна к ошибке разности фаз  $\Delta\alpha=\alpha-\alpha_c$ , наименее чувствительна к ошибке разности напряжений  $\Delta U=U-U_c$  и имеет среднюю чувствительность к ошибке разности частот  $\Delta f=f-f_c$ . Поэтому при проведении точной синхронизации сначала подгоняют напряжения (по вольтметрам), затем – частоты (по частотомерам) и на заключительном этапе подгоняют фазы (по стрелочному или ламповому синхроскопу). Ламповый синхроскоп представляет набор из трех ламп накаливания, каждая из которых подключена одним концом к фазам СГ, а другим – к одноименным фазам сети. При совпадении фаз СГ и сети лампы не горят. Такой синхроскоп называют *синхроскопом на погасание*.

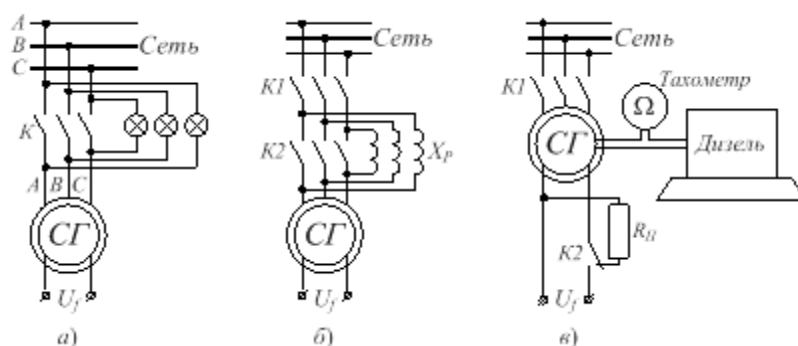


Рисунок 6.1- Схема синхронизация СГ на сеть по способу: а – точной синхронизации, б – грубой синхронизации и в- самосинхронизации

*Способ грубой синхронизации.* Схема способа грубой синхронизации приведена на рис.6.1,б). СГ включает в сеть возбужденным. Этот способ является только ручным и применяется в тех случаях, когда устройство автоматической синхронизации не работает.

Перед подключением СГ к сети подгоняют по вольтметрам и частотомерам напряжения и частоты сети и СГ. Разность фаз не контролируют, чем и объясняется спо-

соб синхронизации как грубый.

Сначала замыкается контактор  $K1$ . СГ подключается к сети через реактор  $X_P$ . Из-за отсутствия подгонки фаз возникнет уравнильный ток. Реактор как раз и ограничивает уравнильный ток на допустимом уровне.

После того, как СГ втянется в синхронизм, что контролируется амперметром в цепи статора по спаданию практически до нуля тока в его обмотках, что свидетельствует о совпадении электрических фаз СГ и сети, контактором  $K2$  шунтируют реактор. СГ напрямую включается в сеть.

*Способ самосинхронизации.* Схема способа самосинхронизации приведена на рис.6.1,б). СГ включает в сеть невозбужденным, как асинхронный двигатель. Этот способ является только ручным и применяется в тех случаях, когда устройство автоматической синхронизации не работает.

Обмотка возбуждения замкнута на пусковое сопротивление  $R_L$ . Контроль напряжения СГ и его частоты в принципе невозможен, так как генератор не возбужден и е.д.с.  $E$  нулевая. Перед включением в сеть СГ разгоняют до почти синхронной частоты вращения ( $\omega_0^{\pm 5\%}$ ), что контролируется по тахометру дизеля. Затем контактором  $K1$  подключают СГ к сети. Уравнильный ток при подключении СГ находится в допустимых пределах  $(0,7...0,8)I_{ном}$ . Невозбужденный СГ для сети представляет асинхронный двигатель.

В статоре подключенного к сети СГ появляются токи, которые создают вращающееся магнитное поле статора. Демпферная обмотка и обмотка возбуждения, замкнутая на сопротивление  $R_L$ , создают асинхронный вращающий момент, который уже электрическим способом в помощь дизелю подводит частоту вращения СГ ближе к синхронной ( $\omega_0^{\pm 2\%}$ ). При спадании тока статора до некоторого наперед заданного малого значения, обмотку возбуждения переключают контактором  $K2$  на питание от напряжения возбуждения  $U_f$ . СГ втягивается в синхронизм.

#### ***Указание по технике безопасности:***

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

#### **Описание электрической схемы соединений**

Источник  $G1$  - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока  $G2$  используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока  $M2$ , работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением.

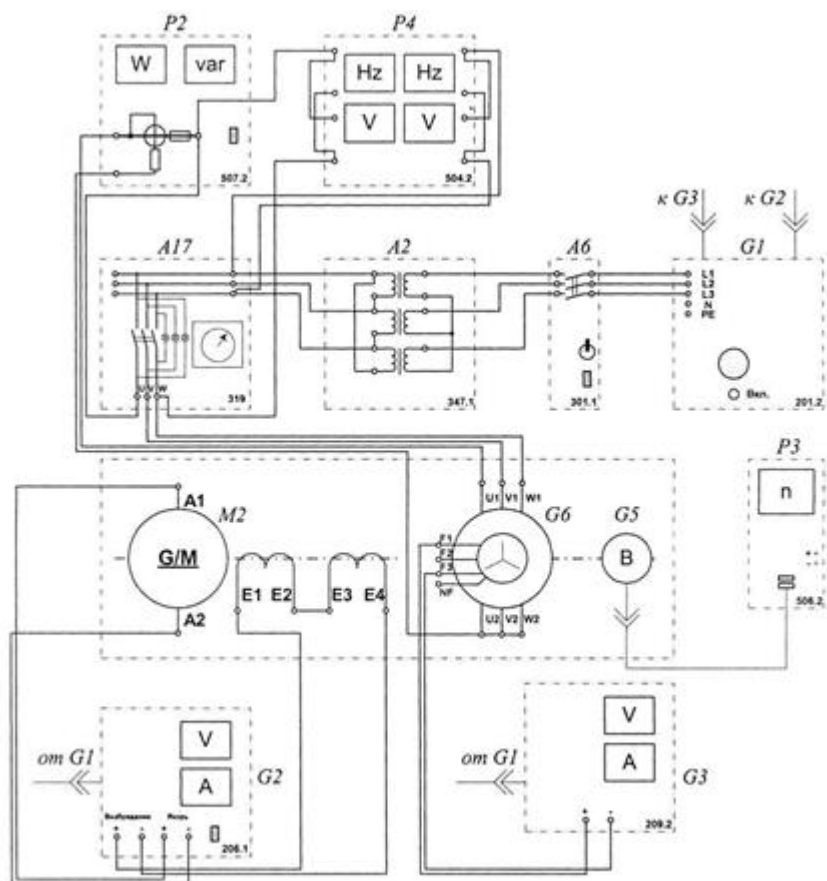
Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока G6, работающей в режиме синхронного генератора.

Синхронный генератор G6 связан с сетью (источником G1) через блок синхронизации A17, трехфазную трансформаторную группу A2 и выключатель A6.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

С помощью измерителя P2 контролируются активная и реактивная мощности, развиваемые испытуемым генератором G6.

С помощью измерителя P4 контролируются напряжения и их частоты со стороны генератора G6 и со стороны электрической сети.



### Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока. (Приложение Б)
- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания G1



- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Переключатели режима работы источника G2, возбудителя G3, выключателя A6 и блока синхронизации A17 переведите в положение "РУЧН."
- Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- Установите переключателем в трехфазной трансформаторной группе A2 номинальные напряжения: вторичных обмоток трансформаторов - 220 В.
- Включите выключатели "СЕТЬ" выключателя A6, блока синхронизации A18, измерьте мощности P2 и указателя P3.
- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, установите частоту вращения двигателя M2 (генератора G6)  $1500 \text{ мин}^{-1}$ .
- Включите выключатель A6 нажатием на кнопку "ВКЛ" на его передней панели.
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3.
- Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, установите напряжение между фазами (линейное) генератора G6 равным напряжению между одноименными фазами сети.
- Обеспечьте условия синхронизации согласно табл. 2.9.1, после чего, нажатием на кнопку ВКЛ." блока синхронизации A17, подключите генератор G6 к сети.
- Убедитесь, что генератор G6 вошел в режим синхронной работы с сетью, о чем должно свидетельствовать отсутствие колебаний значений его режимных параметров.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, нагрузите генератор G6 активной мощностью, например, до 30 Вт, которую определяйте утроением показаний ваттметра измерителя P2.
- Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, нагрузите генератор G6 реактивной мощностью с отстающим (опережающим) коэффициентом мощности, например, до 30 ВАр, которую определяйте утроением показаний варметра измерителя P2.
- Для отключения генератора G6 от сети: разгрузите его по активной и реактивной мощностям, нажмите кнопку "ОТКЛ." блока синхронизации A17, поверните регулировочные рукоятки сначала у возбудителя G3, а затем у источника G2 против часовой стрелки до упора, отключите выключатели "СЕТЬ" блоков, задействованных в эксперименте, отключите источник G1 нажатием на кнопку - гриб и последующим отключением ключа - выключателя.

Таблица 1.1

| Условие                                                             | Средство контроля                                   | Критерий выполнения условия                                                                                                                                     | Критерий невыполнения условия                                                                    | Рекомендации по выполнению условия                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Равенство напряжений синхронного генератора и сети                  | Вольтметры со стороны синхронного генератора и сети | Напряжения со стороны синхронного генератора и сети равны                                                                                                       | Напряжения со стороны синхронного генератора и сети не равны                                     | Регулировать напряжения возбуждения синхронного генератора до момента выравнивания напряжений со стороны синхронного генератора и сети |
| Одинаковое чередование фаз напряжений синхронного генератора и сети | Лампы в разрывах фаз                                | Лампы в фазах: периодически одно- временно загораются и гаснут (частоты напряжений не равны); горят (напряжения в противофазе); не горят (напряжения синфазные) | Лампы в фазах периодически не одновременно загораются и гаснут, создавая эффект "кругового огня" | Переключить любые две фазы синхронного генератора                                                                                      |
| Равенство частот синхронного генератора и сети                      | Лампы в разрывах фаз или синхроноскоп               | Лампы в фазах горят постоянно без мерцания (напряжения в противофазе) или не горят (напряжения синфазные); стрелка синхроноскопа неподвижна                     | Лампы в фазах загораются с частотой скольжения; стрелка синхроноскопа вращается                  | Регулировать частоту вращения синхронного генератора                                                                                   |

|                                                      |                                     |                                                           |                                                           |                                                                        |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Синфазность напряжений синхронного генератора и сети | Лампы в разрывах фаз или синхроскоп | Лампы в фазах не горят; стрелка синхроскопа смотрит вверх | Лампы в фазах горят; стрелка синхроскопа не смотрит вверх | Регулировать частоту вращения синхронного генератора до погасания ламп |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|

*Подключение к сети трехфазного синхронного генератора методом самосинхронизации*

### **Описание электрической схемы соединений**

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока M2, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока G6, работающей в режиме синхронного генератора.

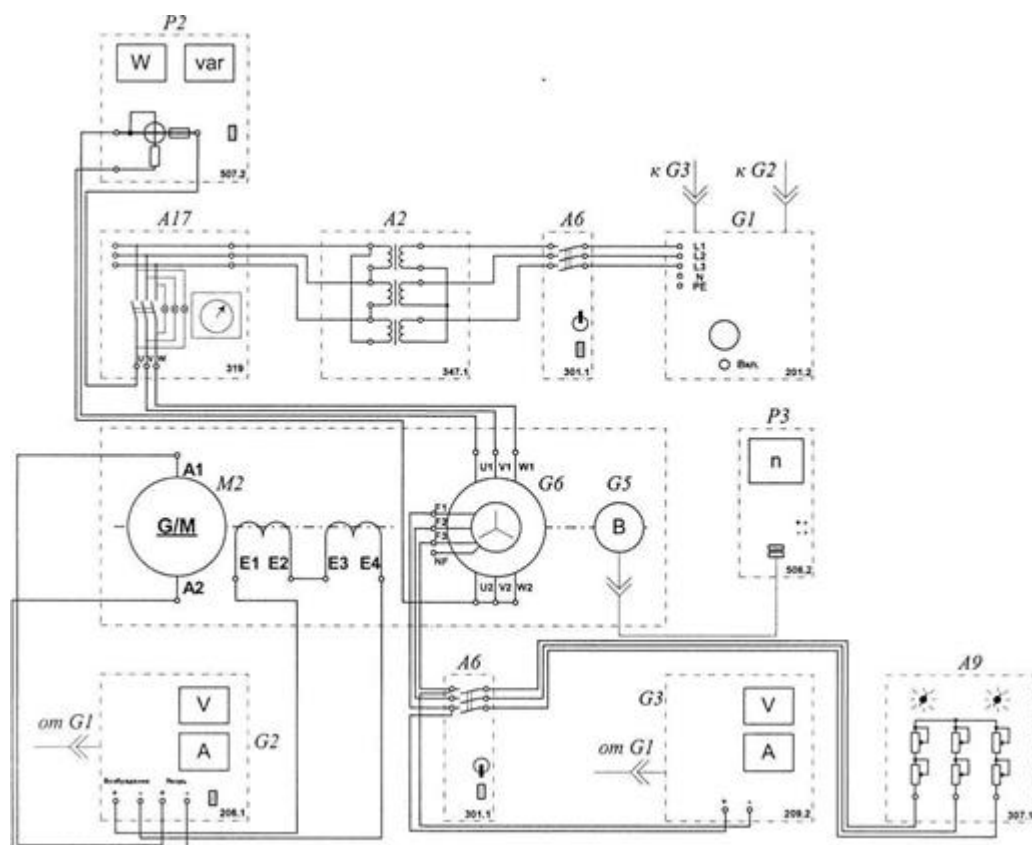
Синхронный генератор G6 связан с сетью (источником G1) через блок синхронизации A17 и трехфазную трансформаторную группу A2.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Реостат A9 выполняет роль резистора синхронизации и подключается выключателем A6 к обмотке возбуждения синхронного генератора G6 на этапе асинхронного пуска последнего.

С помощью измерителя P2 контролируются активная и реактивная мощности, развиваемые испытуемым генератором G6.

С помощью измерителя P4 контролируются напряжения и их частоты со стороны генератора G6 и со стороны электрической сети.



## Указания по проведению эксперимента

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (Приложение Б).

Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1.

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Переключатели режима работы источника G2, возбудителя G3, выключателя A6 и блока синхронизации A17 переведите в положение "РУЧН."
- Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- Установите суммарное сопротивление фаз реостата A4, равными 8 Ом.
- Установите переключателем в трехфазной трансформаторной группе A2 номинальные напряжения: вторичных обмоток трансформаторов 220 В
- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, установите частоту вращения двигателя M2 (генератора G6)  $1500 \text{ мин}^{-1}$ .
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3.
- Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3 по часовой стрелке, установите ток возбуждения генератора G6, равным 1,5 А, и убедитесь, что свечение индикаторных ламп блока синхронизации A17 меняется синфазно. В противном случае при эффекте "бегущего огня" переключите любые две фазы генератора G6.
- Нажмите кнопку «ОТКЛ.» возбудителя G3.
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." выключателя A6.
- Подключите генератор G4 к сети путем включения выключателя "СЕТЬ" и нажатия кнопки "ВКЛ." блока синхронизации A17.
- По окончании разгона генератора G6 нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3.
- Убедитесь, что генератор G6 вошел в режим синхронной работы с сетью, о чем должно свидетельствовать отсутствие колебаний значений его режимных параметров.
- Отключите выключатель A6 нажатием на кнопку "ОТКЛ.".
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, нагрузите генератор G6 активной мощностью, например, до 30 Вт, которую определяйте утроением показаний ваттметра измерителя P2.
- Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, нагрузите генератор G6 реактивной мощностью с отстающим (опережающим) коэффициентом мощности, например, до 30 ВАр, которую определяйте утроением показаний варметра измерителя P2.
- Для отключения генератора G6 от сети: разгрузите его по активной и реактивной мощностям, нажмите кнопку "ОТКЛ." блока синхронизации A17, поверните регулировочные рукоятки сначала у возбудителя G3, а затем у источника G2 против часовой стрелки до упора, отключите выключатель "СЕТЬ" возбудителя G3, источника G2, блока синхронизации A17, выключателя A6, измерителя P2 и указателя P3, отключите источник G1 нажатием на кнопку - гриб и последующим отключением ключа - выключателя.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните способ точной синхронизации.
2. Поясните способ грубой синхронизации.
3. Поясните способ самосинхронизации.

**Лабораторная работа № 16. Параметры синхронных машин. Снятие угловых характеристик  $P = f(\theta)$ ,  $Q = f(\theta)$ ,  $U = f(\theta)$  трехфазного синхронного генератора. Снятие  $U$  – образной характеристики  $I = f(I_f)$  трехфазного синхронного генератора.**

**Цель работы:** Определить угловые характеристики  $P = f(\theta)$ ,  $Q = f(\theta)$ ,  $U = f(\theta)$  трехфазного синхронного генератора

**Основы теории:**

Рассмотрим подробнее эффекты, возникающие при регулировании реактивной мощности СГ. Векторная диаграмма для анализа, представленная на рис.7.1, построена по упрощенному уравнению неявнополюсного СГ.

Работа СГ с постоянным моментом в сети бесконечной мощности, в которой напряжение  $U = \text{const}$  и  $f = \text{const}$ , означает, что в соответствии формулой момента СГ, в которой  $U$ ,  $\omega$  и  $x_a$  являются постоянными величинами, должно выполняться тождество

$$E_n \sin \theta_n = \text{const},$$

где  $E_n$  и  $\theta_n$  – э.д.с. и угол нагрузки СГ при различных токах возбуждения  $I_f$ .

По этому тождеству на рис. 7.1 проведена штрих-пунктирная линия  $e-e$ , являющаяся геометрическим местом концов векторов  $E_n$ .

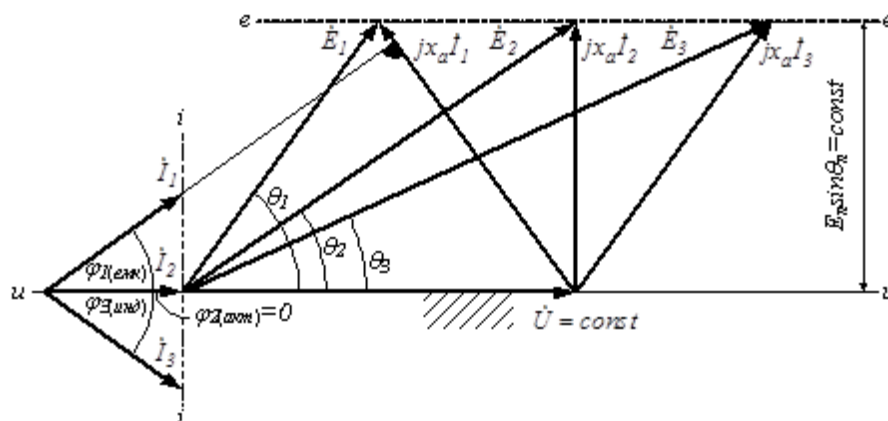


Рисунок 7.1- Векторные диаграммы СГ при регулировании реактивности тока

На рисунке проведены три вектора э.д.с.  $\dot{E}_1, \dot{E}_2, \dot{E}_3$  из множества возможных. На концах этих векторов и конце вектора  $\dot{U}$  в соответствии с построены векторы падений напряжения  $jx_a \dot{I}_1, jx_a \dot{I}_2, jx_a \dot{I}_3$  на синхронном индуктивном сопротивлении  $x_a$  СГ. Далее, перпендикулярно построенным векторам  $jx_a \dot{I}_1, jx_a \dot{I}_2, jx_a \dot{I}_3$  проведены вектора токов  $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$ , которые сгруппированы на чертеже слева и изображены исходящими из одной точки. Ввиду подобия фигур, образованных пучками векторов  $jx_a \dot{I}_1, jx_a \dot{I}_2, jx_a \dot{I}_3$  и  $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$ , концы векторов

$\dot{I}_1, \dot{I}_2 \in \dot{I}_3$  расположены на одной прямой линии, которая обозначена как  $i-i$ . Проекциями векторов  $\dot{I}_1, \dot{I}_2 \in \dot{I}_3$  на ось  $i-i$  являются их реактивные составляющие, а проекциями на ось  $u-u$  вектора напряжения  $\dot{U}$  являются их активные составляющие. Из построений следует, что активная составляющая любого тока из пучка  $\dot{I}_1, \dot{I}_2 \in \dot{I}_3$  равна чисто активному току  $I_2$ . Значит, побочного эффекта при регулировании реактивной мощности нет.

Учтем тот факт, что построенные токи  $\dot{I}_1, \dot{I}_2 \in \dot{I}_3$  СГ являются одновременно токами, отдаваемые СГ в сеть на шины с  $U = \text{const}$ . Из построений видно, что при перевозбуждении (э.д.с.  $E_3$ ) СГ отдает в сеть реактивную мощность, которая покрывает ее расходование на индуктивную нагрузку сети, а при недовозбуждении (э.д.с.  $E_1$ ) СГ покрывает расходование реактивной энергии на емкостную нагрузку сети. Так как в промышленных сетях электрическая нагрузка является активно-индуктивной, то недовозбужденный СГ никакой емкостной реактивной мощности не вырабатывает, а сам потребляет от других СГ, работающих на сеть, реактивную мощность индуктивного характера. Естественно, работа СГ недовозбужденным должна быть исключена.

Отображенная на рис.7.1 зависимость величины тока  $I$  СГ от э.д.с.  $E$  и, соответственно, от тока возбуждения  $I_f$  его, представленная графически, называется U-образной характеристикой (рис.7.2). С помощью U-образной характеристики можно решить следующие задачи:

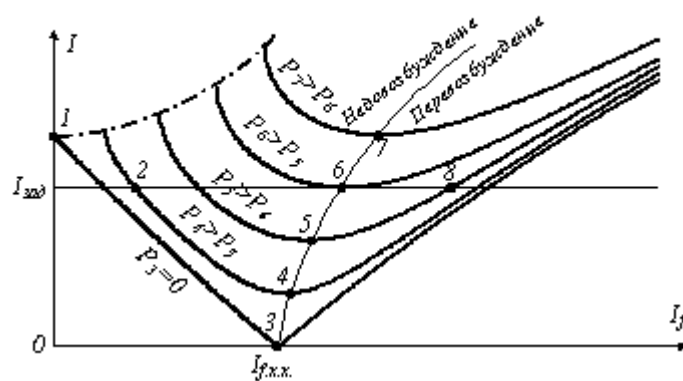


Рисунок 8.2- U-образные характеристики СГ

- 1) определить величину активного тока при заданной мощности, отдаваемой СГ в сеть (точки на линии 3-4-5-6-7);
- 2) при заданном токе СГ определить максимальную активную мощность, которую он может отдать в сеть, например, при отмеченном на рис.4.22 токе  $I_{зад}$  максимальная мощность равна  $P_6$ ;
- 3) при заданном токе СГ и его активной мощности  $P$  определить значения активной и реактивно составляющих тока, например, при токе  $I_{зад}$  и мощности  $P_6$  весь ток активный, а

при мощности  $P_4$  активным будет ток  $I_4$ , определенный для точки 4, а реактивным - ток  $\sqrt{I_{\phi\dot{a}\dot{a}}^2 - I_4^2}$ ;

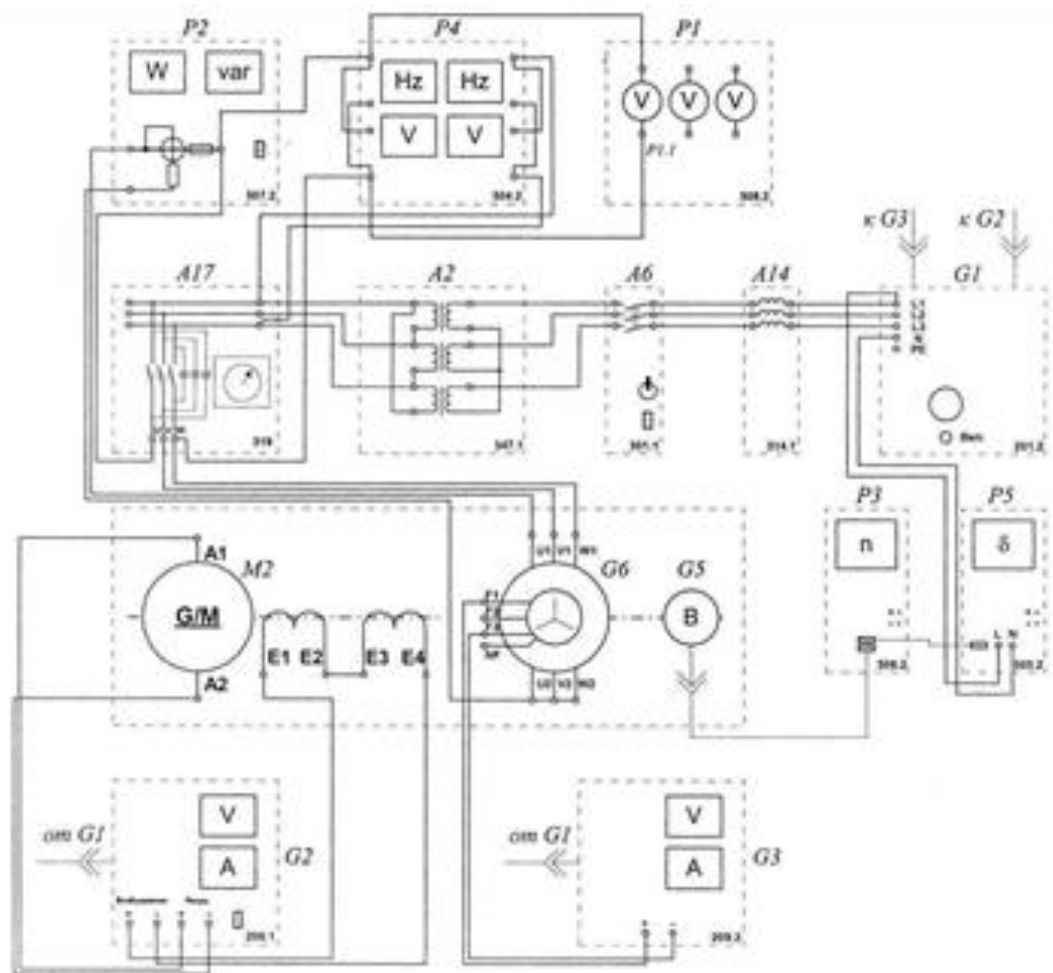
4) при заданной мощности  $P$ , отдаваемой СГ в сеть, определить граничное значение тока возбуждения, разделяющее режимы недовозбуждения и перевозбуждения (линия 3-4-5-6-7).

#### **Указание по технике безопасности:**

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

#### **Описание электрической схемы соединений**

Источник  $G1$  - источник синусоидального напряжения промышленной частоты. Источник питания двигателя постоянного тока  $G2$  используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока  $M2$ , работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением.



Возбудитель  $G3$  служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока  $G6$ , работающей в режиме синхронного генератора.



[illegible]

|                                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b>Вт</b>                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>Q<sub>1</sub>,<br/>В·Ар</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>U, В</b>                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- В случае перехода генератора G6 в асинхронный режим работы разгрузите его по активной мощности, вращая регулировочную рукоятку источника G2 против часовой стрелки до тех пор, пока не восстановится синхронная работа генератора G6 с сетью.

- По завершении эксперимента произведите отключение генератора G6 от сети.
- Используя данные таблицы 1.1, для каждого значения угла нагрузки  $\theta$  вычислите полные активную  $P=3P_1$  и реактивную  $Q=3Q_1$  мощности генератора G6 и занесите их в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

|                                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b><math>\delta</math>,<br/>град</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>P,<br/>Вт</b>                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>Q,<br/>В·Ар</b>                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- Используя данные табл. 2.10.1 и 2.10.2, постройте искомые угловые характеристики  $P=f(\theta)$ ,  $Q=f(\theta)$ ,  $U=f(\theta)$  трехфазного синхронного генератора.

*Снятие U – образной характеристики  $I = f(I_e)$  трехфазного синхронного генератора*

#### Описание электрической схемы соединений

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

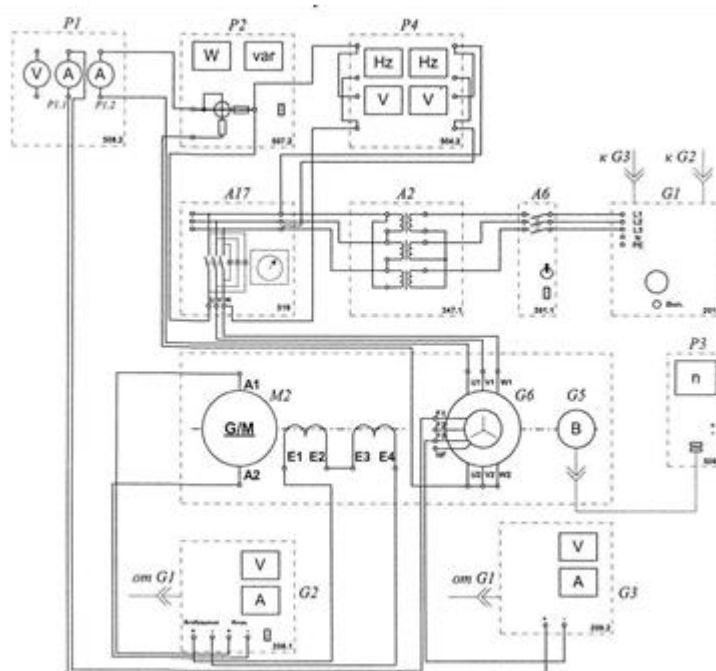
Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока M2, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока G6, работающей в режиме синхронного генератора.

Синхронный генератор G6 связан с сетью (источником G1) через блок синхронизации A17, трехфазную трансформаторную группу A2 и выключатель A6.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

С помощью измерителя Р2 контролируются активная и реактивная мощности, развиваемые испытуемым генератором G6.



## Указания по проведению эксперимента

- Осуществите подключение к сети синхронного генератора G6 методом точной синхронизации.
- Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, установите желаемую активную мощность генератора G6, например, 30 Вт, которую определяйте утроением показаний ваттметра измерителя P2, и поддерживайте её в ходе эксперимента неизменной.
- Вращая регулировочную рукоятку возбуждателя G3, изменяйте ток возбуждения  $I_b$  генератора G6 (не превышая значения 2 А) и записывайте показания амперметров P1.1 (ток  $I_b$ ) и P1.2 (ток  $I$  статорной обмотки генератора G6) в таблицу 1..1.

Таблица 1.3.

[illegible]

- В случае перехода генератора G6 в асинхронный режим работы разгрузите его по активной мощности, вращая регулировочную рукоятку источника G2 против часовой стрелки до тех пор, пока не восстановится синхронная работа генератора с сетью.

- По завершении эксперимента произведите отключение генератора G6 от сети. Используя данные табл. 1.1. постройте искомую U-образную характеристику  $I=f(I_v)$  трехфазного синхронного генератора.

### **Контрольные вопросы**

1. Почему геометрическими местами концов векторов э.д.с. и токов статора являются прямые линии?
2. Почему нет прямой пропорции между токами возбуждения и статора СГ?
3. Какие задачи могут быть решены с использованием U -образной характеристики?

**Лабораторная работа №17. Параметры синхронных машин. Регистрация и отображения на компьютере тока трехфазного короткого замыкания синхронного генератора.**

**Цель работы:** Рассмотреть регистрацию и отображение на компьютере тока трехфазного короткого замыкания синхронного генератора

**Основы теории:**

В процессе эксплуатации синхронных генераторов возможны эксплуатационные короткие замыкания, которые происходят внезапно при полном напряжении сети, поэтому их называют внезапными. Они могут возникать вследствие пробоя изоляции фаз на каком – либо участке сети (при земляных работах, например). Возникающие при этом токи короткого замыкания могут превышать номинальный ток СГ в десятки раз. Эти токи могут оказывать термическое действие на обмотки СГ, но так как защита достаточно быстро сработает и отключит короткозамкнутый участок, то обмотки генератора за доли секунды перегреться не успеют. Но токи короткого замыкания могут оказывать динамическое действие на обмотки, из – за чего возникают большие динамические усилия в обмотках, способные разрушить СГ. Поэтому учет этих токов и умение их рассчитывать на стадии проектирования СГ очень важны.

Дело в том, что токи установившегося короткого замыкания, которые могут иметь место при затухании переходных процессов при коротком замыкании или при замыкании СГ при отсутствии тока возбуждения и последующем плавном увеличении тока возбуждения, составляют небольшую величину по сравнению с номинальным током и могут быть даже меньше его. При внезапном коротком замыкании при полном токе возбуждения ударные токи могут кратковременно (доли сек.) превышать номинальный ток СГ в несколько раз. Особенно большие токи внезапного короткого замыкания могут быть в явнополюсных СГ (например, в гидрогенераторах).

Рассмотрим явления при трехфазном коротком замыкании на выводах машины. Симметричное трехфазное короткое замыкание обмотки якоря происходит при работе машины на холостом ходу, а частота вращения, насыщения и напряжения, приложенное к обмотке возбуждения, не изменяются.

При внезапном коротком замыкании можно считать, что потокосцепление обмотки якоря остается неизменным ( $\psi = \text{const}$ ). Активное сопротивление обмотки якоря значительно меньше индуктивного, поэтому в уравнении:

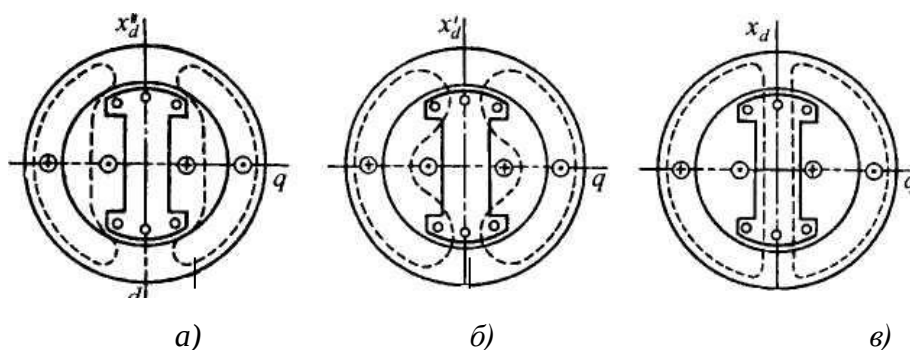


Рисунок 8.1- Состояния синхронной машины в оси  $d$  при переходном процессе

$$-\frac{d\Psi}{dt} = ri,$$

при  $r = 0$

$$\frac{d\Psi}{dt} = 0$$

и  $\Psi = \text{const.}$

В первый момент короткого замыкания ток якоря создает магнитный поток, который начинает проникать в ротор. Исходя из постоянства потокосцепления при изменении тока в статоре, можно сделать вывод, что в обмотках ротора возникает дополнительный ток, препятствующий проникновению потока статора в ротор.

На рис.8.1 показано два состояния, качественно характеризующих процессы в синхронной машине по оси  $d$  при переходном процессе. При изменении тока в якоря в первый момент демпферная обмотка препятствует проникновению потока в обмотку возбуждения. Это положение определяется сверхпереходным сопротивлением  $x_d''$  (рис. 8.1 а). После того, как поток проник в демпферную обмотку, изменению его препятствует обмотка возбуждения. Это состояние машины характеризуется переходным сопротивлением  $x_d'$  (рис. 8.1 б). В установившемся режиме машина имеет по продольной оси сопротивление  $x_d$  (рис. 8.1 в).

Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси  $x_d''$  и переходное сопротивление  $x_d'$  характеризуется соответствующими схемами

замещения, показанными на рис. 8.2.

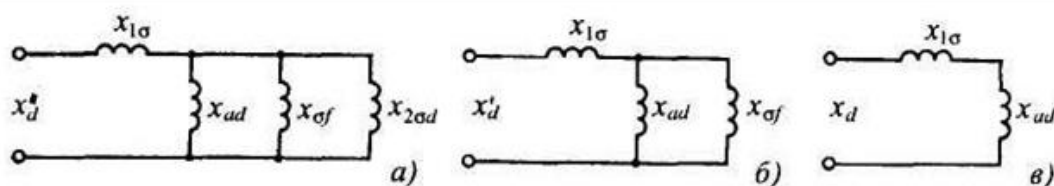


Рисунок 8.2- Схемы замещения, характеризующие состояние машины в переходном процессе по оси  $d$

Во всех схемах замещения сопротивления приведены к обмотке якоря. Сверхпереходное сопротивление  $x_d''$  определяется параллельным соединением индуктивного сопротивления  $x_{2\sigma d}$ , учитывающего влияние демпферной обмотки, и сопротивления  $x_{of}$ , учитывающего влияние обмотки возбуждения на переходный процесс.

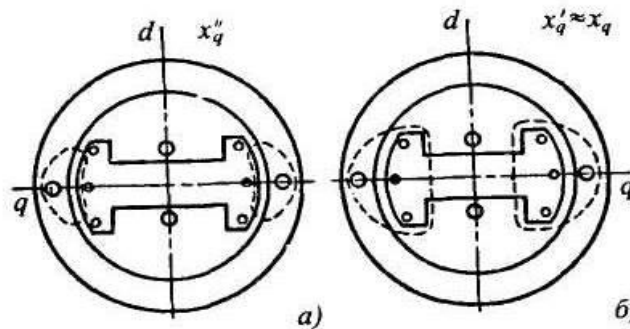


Рисунок 8.3-Состояние синхронной машины по оси q при переходном процессе

При отсутствии демпферной обмотки переходное сопротивление  $x_d'$  определяется установившимся сопротивлением реакции якоря  $x_{ad}$  и сопротивлением  $x_{of}$ , учитывающим демпфирующие свойства обмотки возбуждения.

Сопротивления  $x_{of}$  и  $x_{2\sigma d}$  значительно меньше, поэтому  $x_d'' < x_d' < x_d$ . В относительных единицах  $x_d'' = 0,1 \div 0,3$ ,  $x_d' = 0,25 \div 0,4$ .

По поперечной оси машины при активном токе в обмотке якоря в процессе изменения тока в обмотках при постоянстве потокосцепления процессы протекают подобно тому, как они протекают по продольной оси. В начальный момент машина с демпферной обмоткой характеризуется сверхпереходным индуктивным сопротивлением  $x_q''$  (рис. 8.3, а). Переходное индуктивное сопротивление по поперечной оси машины  $x_q'$  характеризует машину в переходном процессе без демпферной обмотки (рис. 8.3, б). Сопротивление  $x_{2\sigma q}$  характеризует демпфирующее влияние демпферной обмотки по оси q.

Для сверхпереходного и переходного сопротивлений по поперечной оси, так же, как и для соответствующих сопротивлений по продольной оси, могут быть предложены эквивалентные схемы замещения (рис. 8.4, а, б).

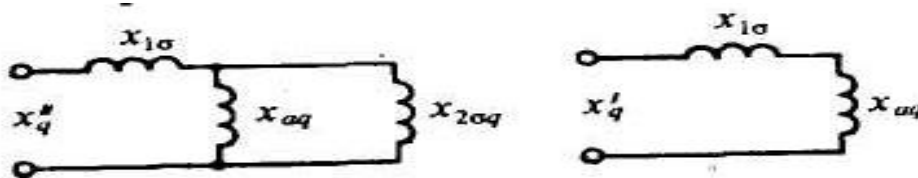
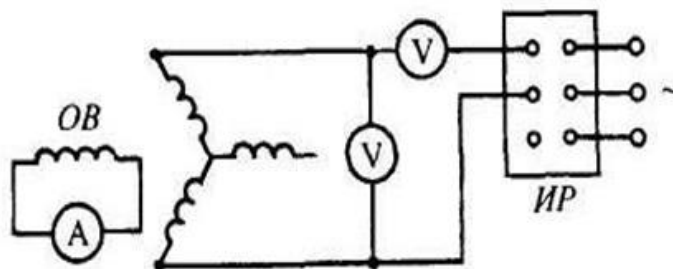


Рисунок 8.4- Схемы замещения, характеризующие состояние машины по оси q

Хотя  $x_d > x_q$ , обычно  $x_d'' \leq x_q''$ . Это объясняется тем, что по поперечной оси меньше демпфирующих контуров. Для турбогенераторов  $x_q'' = 0,12 \div 0,25$ , а для гидрогенераторов  $x_q'' = 0,15 \div 0,35$ .



Опытным путем параметры  $x_d''$  и  $x_q''$  могут быть найдены по данным следующих опытов: 1) внезапного трехфазного короткого замыкания; 2) опыта восстановления напряжения; 3) при пульсирующем поле обмотки статора и произвольном положении ротора; 4) при пульсирующем поле обмотки статора и установке ротора в продольном и поперечном направлениях. В последнем опыте осуществляют медленное вращение ротора в пульсирующем поле статора при замкнутой амперметром обмотке возбуждения (рис. 8.5). При проведении опыта на машину подают пониженное напряжение и по максимальному и минимальному значениям токов находят сверхпереходные сопротивления:

$$x_d'' = \frac{U}{2I_{\max}};$$

$$x_q'' = \frac{U}{2I_{\min}}.$$

При повороте ротора ось поля попеременно совпадает с продольной и поперечной осями машины и ток определяется сопротивлениями по продольной и поперечной осям машины. Близкие процессы имеют место и при коротком замыкании.

В машине без демпферной обмотки, таким образом, определяются  $x_d'$  и  $x_q'$

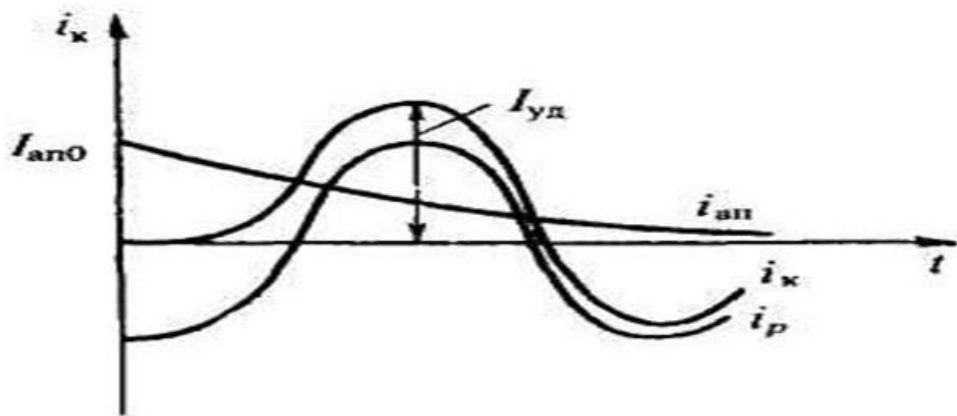
Определение опытным путем индуктивного сопротивления обратной последовательности и сверхпереходных параметров отличается лишь тем, что при определении  $x_2$  частота вращения номинальная, а при определении  $x_d''$  и

— близка к нулю. Значения  $x_2$  и  $x_d''$  обычно близки друг другу.

При коротком замыкании в токах обмотки якоря есть периодические и аperiodические составляющие (рис. 8.6). Периодические составляющие  $i_{\text{п}}$  создают вращающееся поле, неподвижное относительно ротора. Аperiodические составляющие  $i_{\text{ап}}$  создают неподвижное относительно обмоток статора магнитное поле, которое в обмотках ротора наводит перемен-



ные токи частоты сети. Начальное значение аperiodических токов в фазах обмотки статора зависит от момента, когда произошло короткое замыкание. На рис. 8.6 показан момент короткого замыкания, когда аperiodический ток максимален.



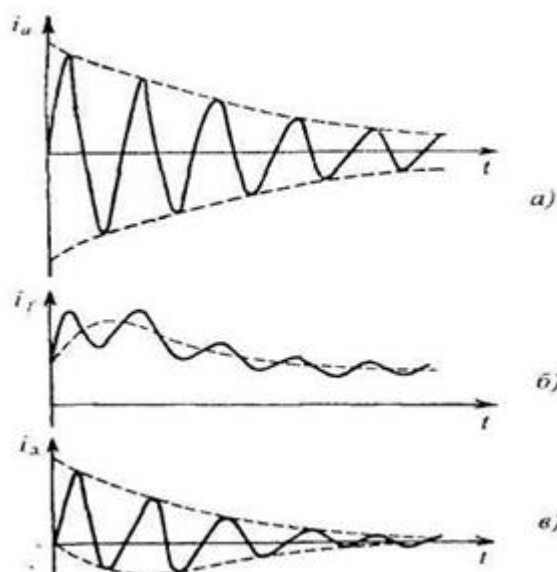
Наиболее опасно для синхронной машины ударное значение тока короткого замыкания, которое для машины с демпферной обмоткой может быть принято равным:

$$I_{y\partial} = 1,8 \frac{\sqrt{2} \cdot 1,05 U_{ном}}{x_d''},$$

а для машин без демпферной обмотки

$$I_{y\partial} = 1,8 \frac{\sqrt{2} \cdot 1,05 U_{ном}}{x_d'},$$

Иногда вводят понятие кратности ударного тока



В (2 ) (4) коэффициент 1,8 учитывает затухание аperiodической составляющей и принимается на 5% завышенное напряжение. Наибольшему воздействию токов короткого замыкания подвергаются лобовые части обмоток статора, которые в турбогенераторах имеют большую длину. Для уменьшения деформаций лобовые части обмоток крупных синхронных

машин имеют усиленное крепление. Электродинамические усилия в обмотках пропорциональны квадрату токов. Эти усилия стремятся отогнуть лобовые части обмотки к торцевым частям магнитопровода. ГОСТ ограничивает амплитуду токов короткого замыкания  $I_{уд}$ . Для машин мощностью больше 2 МВт  $I_{уд}$  не должно быть больше 15. На рис. 24, а – в представлено изменение токов синхронной машины при коротком замыкании. значение номинального, на Токи в фазах якоря имеют периодическую апериодическую составляющие, затухающие каждая со своей постоянной времени.

На рис. 8.7, а показано изменение тока фазы  $i_a$ , когда апериодическая составляющая отсутствует. Переходные токи в обмотке возбуждения и демпферной обмотке изменяются по разным законам, зависящим от постоянных времени обмоток (рис. 8.7, б и в).

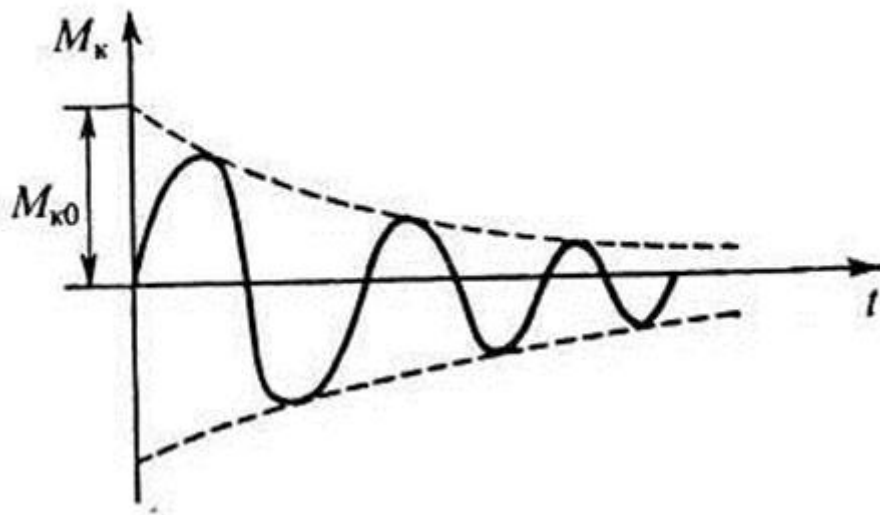
При анализе переходных процессов в синхронных машинах можно говорить о достаточно большом числе постоянных времени. Так для обмотки якоря постоянная времени для среднего значения  $x'_d$  и  $x'_q$ .

при отсутствии демпферной обмотки

$$T_a = \frac{x'_d + x'_q}{2\omega r_a}.$$

Вычисляют также постоянные времени обмоток якоря при разомкнутых и замкнутых поочередно обмотках ротора.

Обмотки ротора имеют свои постоянные времени, а в явнополюсной машине рассматриваются еще и постоянные времени по продольной и поперечной осям машины. Наиболее важные постоянные времени машины указываются в каталогах.



Апериодические токи обмотки якоря наводят в обмотках ротора переменные токи, затухающие в обмотки возбуждения (рис. 8.7, б) и демпферной обмотке (рис. 8.7, в), с раз-

ными постоянными времени. Демпферная обмотка сглаживает колебания токов в обмотке возбуждения, предохраняя возбудитель от перегрузок по току и перенапряжений. Затухание апериодических токов зависит, в основном, от активных сопротивлений контуров.

При коротком замыкании токи, протекающие в обмотках статора и ротора, создают ударные моменты, действующие на вал машины. Знакопеременные моменты ускоряют и замедляют ротор (рис.8.8).

При этом

$$M_{\kappa} = M_{\kappa 0} e^{-\frac{t}{T_{\kappa}}} \sin \omega t,$$

где  $T_{\kappa}$  – постоянная времени, определяющая затухание ударного момента, зависящая от постоянной времени обмотки возбуждения и обмотки якоря.

Так как момент пропорционален токам в статоре и роторе, то

$$\frac{M_{\kappa 0}}{M_{ном}} \approx 5 \div 15.$$

Такое увеличение момента в переходных процессах необходимо учитывать при расчете на прочность валов и муфт, соединяющих синхронные генераторы с турбинами. Ударный момент, так же, как и электромагнитный момент в установившемся режиме, приложен и к ротору и к статору, поэтому болты, крепящие машины к фундаменту, должны быть рассчитаны на эти усилия.

Механические воздействия при коротком замыкании более опасны для машины, чем тепловые, хотя эти процессы и кратковременные.

Переходные процессы в синхронной машине связаны не только с электромагнитными, но и с электромеханическими процессами, сопровождающимися колебаниями частоты вращения.

#### ***Указание по технике безопасности:***

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

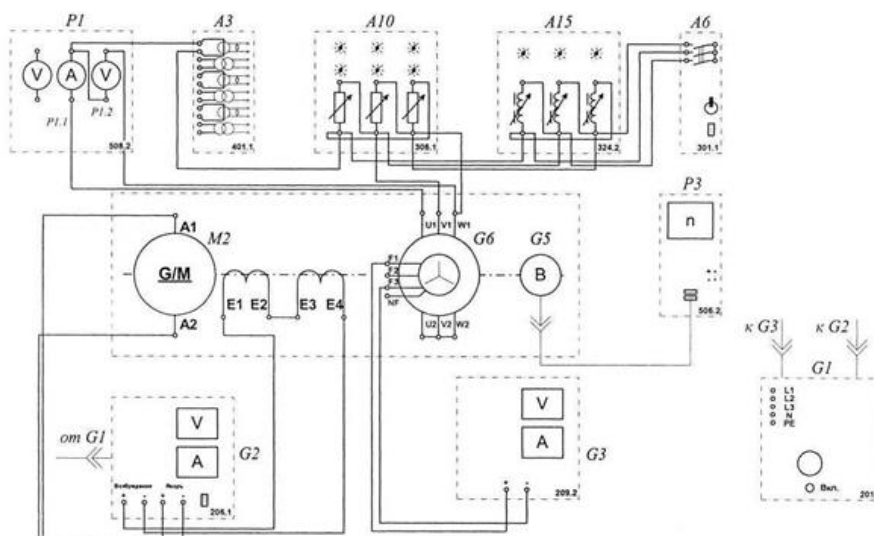
#### **Описание электрической схемы соединений**

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока M2, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока G6, работающей в режиме синхронного генератора.

С помощью мультиметров блока Р1 контролируются ток статорной обмотки и линейное напряжение синхронного генератора G6.



Аналоговые входы

А4

ACH0 ACH8 ACH1 ACH9 ACH2 ACH10 ACH3 ACH11

ACH4 ACH12 ACH5 ACH13 ACH6 ACH14 ACH7 ACH15

Аналоговые выходы

к компьютеру А5

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (Приложение Б).
- Соедините гнезда защитного заземления  устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений. Переключатели режима работы источника G2, возбудителя G3 и выключателя A6 переведите в положение «РУЧН.».
- Регулировочными рукоятками активной A10 нагрузки установите ее значения равными, например, 20% от 50 Вт в каждой фазе.
- Регулировочными рукоятками индуктивной A15 нагрузки установите ее значения равными, например, 15% от 40 Вар в каждой фазе.
- Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- Включите выключатели «СЕТЬ» указателя частоты вращения P3 и блока мультиметров P1
- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ.» источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, установите частоту вращения двигателя M2 (генератора G6)  $1500 \text{ мин}^{-1}$ .
- Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ.» возбудителя G3.
- Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, установите междофазное напряжение генератора G6, например, 220 В.
- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер A5 и запустите прикладную программу "Многоканальный осциллограф". Настройте программу для запоминания, например, последних 5 секунд процесса.
- Нажмите кнопку «ВКЛ» включения сканирования первого канала виртуального осциллографа.
- Включите выключатель «СЕТЬ» выключателя A6.
- Нажмите кнопку «ВКЛ» и спустя 3с (**не более**) - кнопку «ВЫКЛ» выключателя A6 и еще через 1с после этого остановите сканирование программой «Многоканальный осциллограф» нажатием на виртуальную кнопку «Остановить».

- Изменение во времени тока статорной обмотки генератора G4 при коротком замыкании его выводов наблюдайте на мониторе компьютера.

- По завершении эксперимента поверните регулировочные рукоятки сначала у возбудителя G3, а затем у источника G2 против часовой стрелки до упора, отключите выключатели «СЕТЬ» возбудителя G3, источника G2, указателя частоты вращения P3, выключателя A6 и блока мультиметров P1, отключите источник G1 нажатием на кнопку - гриб и последующим отключением ключа - выключателя.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение характеристике холостого хода и поясните вид графика ее.
2. Дайте определение характеристике короткого замыкания и поясните вид графика ее.
3. Какие величины можно рассчитать по х.х.х. и х.к.з.?
4. Дайте определение нагрузочной характеристике и поясните график ее.

$$T_a = \frac{x_d'' + x_q''}{2\omega r_a},$$

**Лабораторная работа №18. Синхронные двигатели и компенсаторы. Пуск в ход трехфазного синхронного двигателя с регистрацией и отображением режимных параметров на компьютере. Снятие угловых характеристик  $P=f(\delta)$ ,  $Q=f(\delta)$ ,  $U=f(\delta)$  синхронного двигателя. Снятие U-образной характеристики  $I=f(I_f)$  трехфазного синхронного двигателя.**

**Цель работы:** Определить угловые характеристики  $P=f(\delta)$ ,  $Q=f(\delta)$ ,  $U=f(\delta)$  синхронного двигателя. Определить U-образные характеристики  $I=f(I_f)$  трехфазного синхронного двигателя

**Теоретическая часть:**

Конструктивно синхронный двигатель (СД) ничем не отличается от СГ (рис.4.1,а). Есть только отличия в назначении его обмоток.

На обмотку статора подается сетевое напряжение. Назначением статора является создание им вращающегося магнитного поля протекающими по обмоткам токами. Это поле необходимо для создания вращающего момента СД и оно не считается полем, искажающим поле обмотки возбуждения, как это видится в СГ. Поэтому, эту обмотку в СД не принято называть якорем.

ОВ так же запитывается от возбудителя, в ней создается ток  $I_f$ . Взаимодействием проводников ОВ, обтекаемых током, с вращающимся магнитным полем статора создаёт синхронный вращающий момент  $M_c$  СД.

Назначение короткозамкнутой демпферной обмотки типа "беличье колесо" также в корне меняется, и она используется в качестве пусковой обмотки для создания асинхронного вращающего момента  $M_a$  на этапе разгона СД от подачи напряжения питания на статор. Однако из-за того, что пусковая обмотка СД всегда выполняется не глубокопазной вследствие малого места, выделенного для ее размещения в пазах полюсных наконечников ОВ, то пусковые характеристики такой обмотки неудовлетворительные. Главное в том, что пусковая обмотка позволяет получить пусковой момент СД на уровне всего  $(0,4...0,5)M_{ном}$ .

На этапе разгона ОВ замыкается на активное сопротивление, по ней протекают токи, и она также создаёт асинхронный вращающий момент СД. Совместным действием пусковой обмотки и ОВ удастся поднять пусковой момент СД до  $(0,6...0,7)M_{ном}$ . Значит, СД должны запускаться максимально разгруженными, что и указывается в паспортных данных СД.

Также из-за того, что стержни пусковой обмотки имеют малое сечение (в сравнении с сечением стержней короткозамкнутой обмотки АД), то во время разгона СД они разогреваются до  $300^\circ$ . Поэтому СД не допускают многократных пусков подряд, что также указывается в паспортных данных СД.

Для СД рассчитываются и используется две механических характеристики:

1) МХ синхронного момента, формула которой точно такая же, как и у СГ, для неявнополюсного и явнополюсного СД, соответственно,

$$M_{c.n} = \frac{3EU}{\omega x_d} \sin \theta, \quad M_{c.y} = \frac{3EU}{\omega x_d} \sin \theta + \frac{3U^2}{2\omega} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

2) МХ асинхронного момента

$$M_a = \frac{2M''_{d.\kappa}}{\frac{s}{s''_{d.\kappa}} + \frac{s''_{d.\kappa}}{s}} + \frac{2M''_{q.\kappa}}{\frac{s}{s''_{q.\kappa}} + \frac{s''_{q.\kappa}}{s}} + \frac{2M'_{d.\kappa}}{\frac{s}{s'_{d.\kappa}(n+1)} + \frac{s'_{d.\kappa}(n+1)}{s}}$$

Асинхронный момент содержит три составляющие;

1. Вращающий момент  $M''_d$ , созданный взаимодействием обтекаемой током пусковой обмоткой, расположенной по оси  $d$ , с полем статора (первое слагаемое в формуле. Значения критического момента  $M''_{d.\hat{e}}$  и критического скольжения  $s''_{d.\hat{e}}$  определяются сопротивлениями пусковой обмотки по оси  $d$  с учетом влияния индуктивно связанных с нею обмоткой статора и ОВ.

2. Вращающий момент  $M''_q$ , созданный взаимодействием обтекаемой током пусковой обмоткой, расположенной по оси  $q$ , с полем статора (второе слагаемое в формуле. Значения критического момента  $M''_{q.\hat{e}}$  и критического скольжения  $s''_{q.\hat{e}}$  определяются сопротивлениями пусковой обмотки по оси  $q$  с учетом влияния индуктивно связанной с нею обмоткой статора.

3. Вращающий момент  $M'_d$ , созданный взаимодействием обтекаемой током обмоткой возбуждения, расположенной по оси  $d$ , с полем статора (третье слагаемое в формуле. Значения критического момента  $M'_{d.\hat{e}}$  и критического скольжения  $s'_{d.\hat{e}}$  определяются сопротивлениями ОВ с учетом влияния индуктивно связанной с нею обмоткой статора. В этом слагаемом также учтена кратность  $n$  пускового сопротивления, на которое замыкается ОВ ( $n=5...10$ ).

Графики асинхронного момента и его составляющих приведены на рис 9.1 и рис.9.2. В диапазоне подсинхронного скольжения  $s_{nc}$  на ОВ подается напряжение возбуждения и СД втягивается в синхронизм. Подсинхронное скольжение выбирается равным 0,03...0,05.



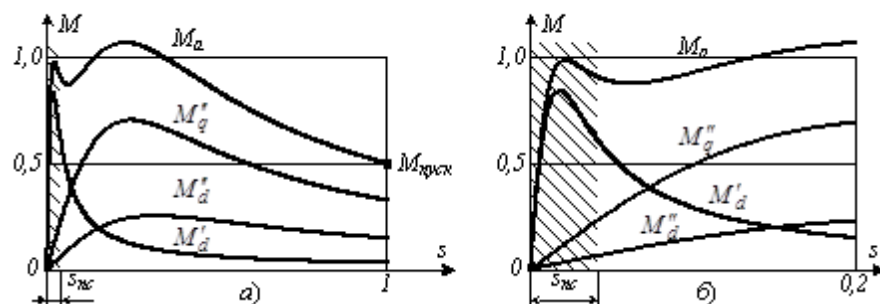


Рисунок 9.1-Асинхронный момент СГ при короткозамкнутой ОВ в диапазоне скольжений от 0 до 1(а) и от 0 до 0,2 (б)

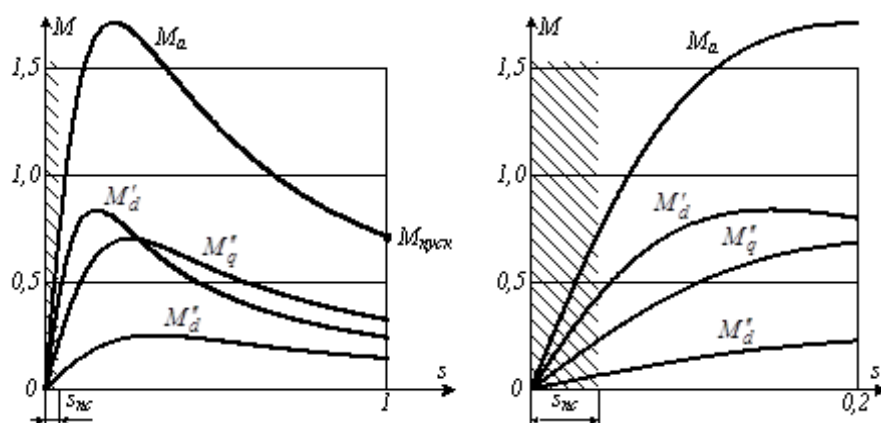


Рисунок 9.2-Асинхронный момент СГ при замкнутой ОВ на  $R_r + 8 \cdot R_f$  в диапазоне скольжений от 0 до 1(а) и от 0 до 0,2 (б)

Влияние пускового сопротивления на механическую характеристику неоднозначно.

При разгоне СД с замкнутой накоротко ОВ пусковой момент составляет всего  $0,5M_{ном}$ , а при замыкании ОВ на 8-кратное пусковое сопротивление пусковой момент увеличивается до  $0,72M_{ном}$ . Значит на пусковые свойства СД влияние пускового сопротивления положительное.

На подсинхронной частоте вращения СД подключение пускового сопротивления дает отрицательный результат – асинхронный момент снижается практически вдвое. СД с подключенным пусковым сопротивлением может просто не достичь малого подсинхронного скольжения и СД и синхронизация окажется невозможной.

Так же как и у СГ возбудители СД могут быть статическими и электромашинными. Схемы пуска СД приведены на рис.9.3.

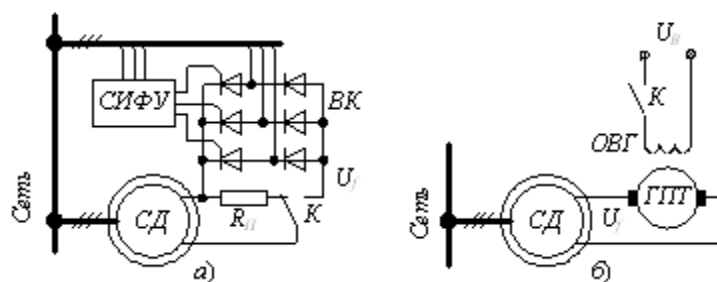


Рисунок 9.3- Схема пуска синхронного двигателя

В схеме пуска со статическим возбудителем (рис.9.3,а) ОВ СД сначала замкнута на пусковое сопротивление  $R_{п}$ , что обеспечивает максимально быстрый разгон СД с повышенным пусковым моментом (рис.8.2,б). Во время быстрого разгона выделяется меньше тепла в пусковой короткозамкнутой обмотке. При достижении подсинхронного скольжения контактором  $K$  отключается пусковое сопротивление  $R_{п}$  от ОВ и на нее подается напряжение возбуждения  $U_f$ . СД втягивается в синхронизм, переходя с асинхронной механической характеристики (9.2) на синхронную (9.3). Так как при разгоне СД с пусковым сопротивлением  $R_{п}$  асинхронный момент значительно понижается при подходе к подсинхронному скольжению, и переключение ОВ на питание от возбудителя всегда происходит при большом скольжении (ближе к 0,05), то при втягивании в синхронизм на ОВ СД подается повышенное (форсированное, больше номинального) напряжение возбуждения.

В схеме пуска с электромашинным возбудителем (рис.8.3,б) ОВ СД наглухо замкнута на якорь ГПТ, который вначале не возбужден – контактор  $K$  в цепи ОВ возбудителя разомкнут. Пусковой момент при таком разгоне минимальный (рис.8.1). Разгон протекает долго, за время разгона пусковая короткозамкнутая обмотка СД успевает сильно разогреться. Однако в районе подсинхронного скольжения асинхронный момент СД высокий, что позволяет легко достичь малого подсинхронного скольжения (около 0,02...0,03). Затем замыкается контактор  $K$  в цепи ОВ генератора постоянного тока, на его выходе устанавливается напряжение, которое подается на ОВ СД. СД втягивается в синхронизм.

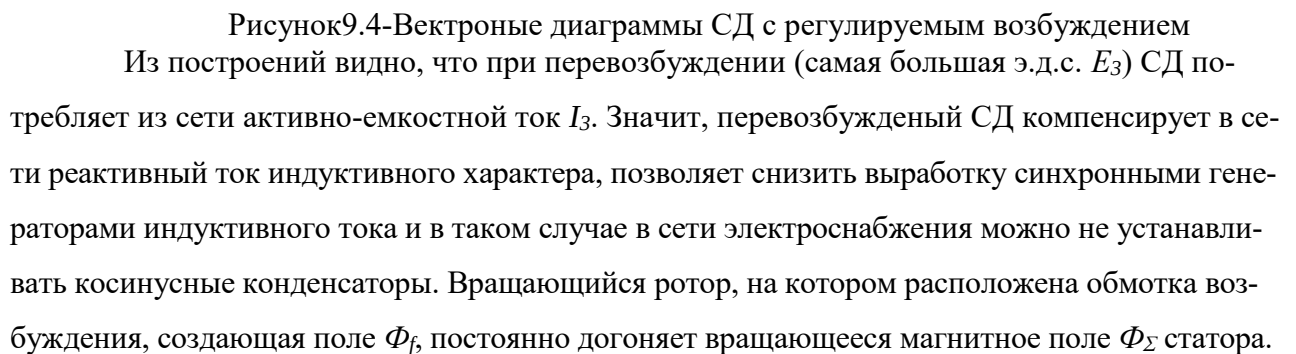
К рабочим характеристикам СД относятся МХ асинхронного, синхронного моментов и регулировочные характеристики реактивного тока (реактивной мощности). МХ СД были рассмотрены в предыдущей теме. Для расчета регулировочных характеристик используем упрощенное уравнение неявнополюсного СД

$$\dot{U} = \dot{E} + j\chi_a \dot{I},$$

где  $\dot{U}, \dot{E}$  - напряжение сети и э.д.с., наведенная полем обмотки возбуждения;

$j\chi_a \dot{I}$  - падение напряжения на обмотке статора СД.

Векторные диаграммы СД, построенные по при различных значениях э.д.с.  $E$ , про-

[illegible]

- обеспечивают постоянство частоты вращения независимо от величины механической нагрузки на валу;
- его можно использовать по альтернативному назначению - компенсации в сети реактивной мощности индуктивного характера;
- менее чем АД чувствительны к понижениям напряжения  $U$  в сети, так как синхронный момент СД зависит от  $U$ , а у АД зависит от  $U^2$ .

- сложный алгоритм, схема пуска и высокая стоимость схемы пуска, из-за чего применение СД экономически оправдывается при их мощности свыше  $100\text{ кВт}$  и, как правило, высоковольтных ( $6$  и  $10\text{ кВ}$ );
- в случае выпадения СД из синхронизма возникает опасный для сети аварийный режим с токами, достигающими двойных токов короткого замыкания.

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания регулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока G4, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением.

Активная нагрузка A10 используется для нагружения генератора G4.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока M1, работающей в режиме синхронного двигателя.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Машина (синхронный двигатель) M1 получает питание от источника G1 через трехфазную трансформаторную группу A2 и выключатель A6.

Реостат A9 выполняет роль резистора синхронизации и подключается выключателем A8 к обмотке возбуждения синхронного двигателя M1 на этапе пуска последнего.

С помощью линейного реактора моделируется сопротивление кабеля, питающего двигатель M1.

Датчики тока и напряжения в блоке A12 обеспечивают гальваническую развязку силовой и измерительной цепей и преобразуют ток и напряжение статорной обмотки испытуемого двигателя M1 в пропорциональные им нормированные напряжения.

Через аналоговые входы ACH0-ACH8, ACH1-ACH9, ACH2-ACH10 коннектора A4 напряжения, пропорциональные частоте вращения, току и напряжению статорной обмотки испытуемого двигателя M1, вводятся в компьютер A5.

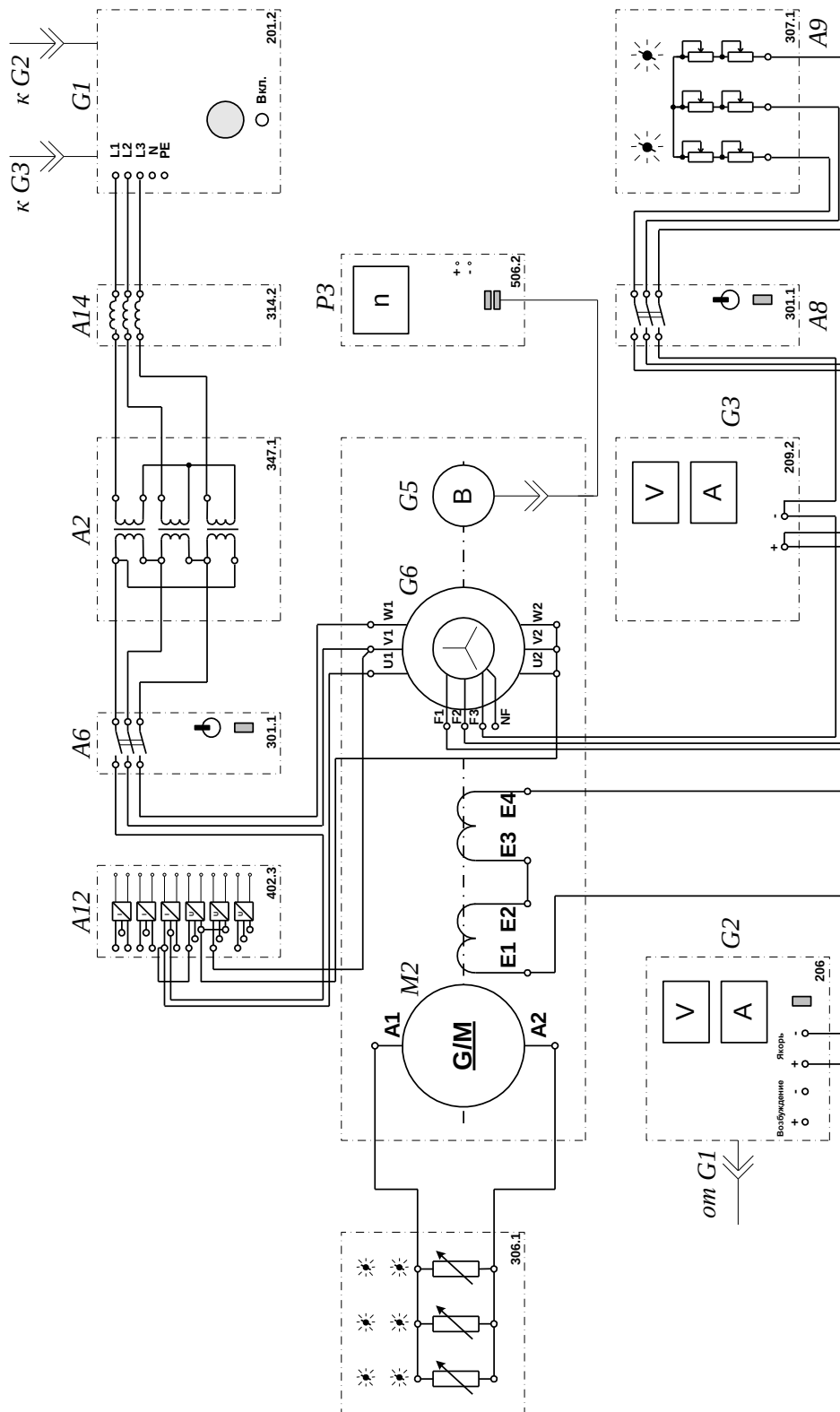


Рисунок 9.5- Электрическая схема соединений

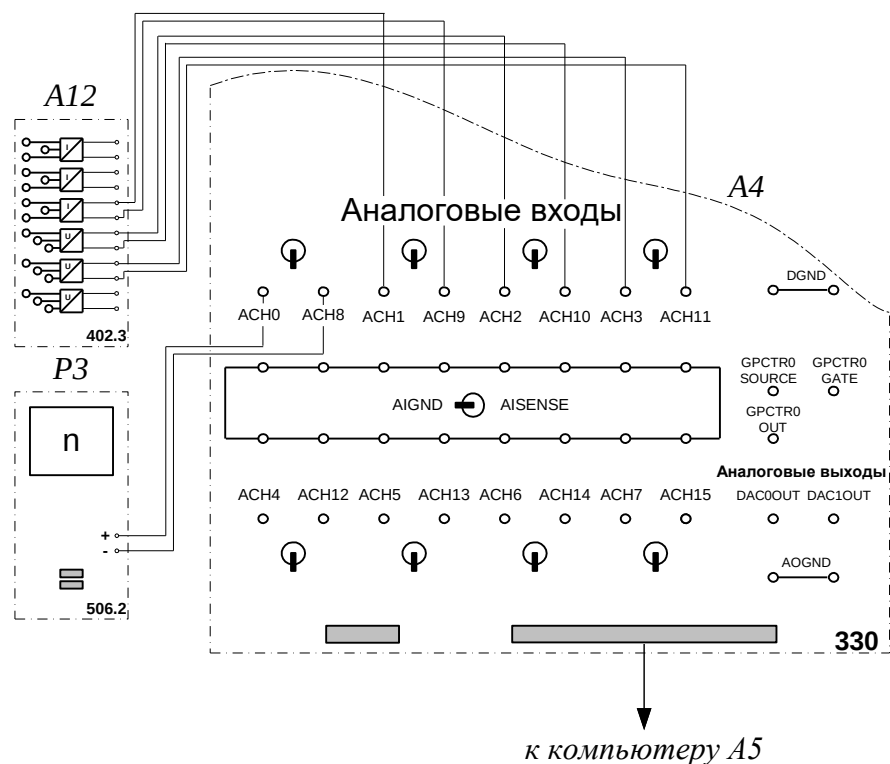


Рисунок 9.6- Электрическая схема соединений (продолжение)

### Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.(рис 8.5:8,6)
- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока. (Приложение Б)
- Соедините гнезда защитного заземления " $\oplus$ " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Переключатели режима работы источника G2, возбудителя G3 и выключателей A6 и A8 установите в положение «РУЧН.».
- Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- Установите в каждой фазе активной нагрузки A10 ее суммарную величину 100 %.
- В трехфазной трансформаторной группе A2 установите номинальное напряжение вторичных обмоток трансформаторов, равное 220 В.
- Установите в каждой фазе реостата A9 суммарное сопротивление 8 Ом.

- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А5, и запустите прикладную программу «Регистратор режимных параметров машины переменного тока».
- Включите выключатели «СЕТЬ» выключателей А6 и А8, указателя частоты вращения Р3 и блока А12 датчиков тока и напряжения.
- Включите выключатель А8 кнопкой «ВКЛ».
- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите на его выходе напряжение, равное 20 В.
- Включите выключатель «СЕТЬ» источника G2 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите напряжение на его выходе, например, 50 В.
- Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» на экране компьютера.
- Нажмите последовательно кнопки «ВКЛ.» источника G2, выключателя А6, возбудителя G3 (после разгона двигателя М1), спустя, например, 5 с кнопку «ОТКЛ.» выключателя А8 и затем не позднее, чем через 10 с, остановите сканирование данных. В результате должен осуществиться пуск нагруженного синхронного двигателя М1 и должны записаться в компьютер данные о режимных параметрах на этапе пуска.
- Нажмите кнопку «ОТКЛ.» источника G1.
- Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Используя возможности программы «Регистратор режимных параметров машины переменного тока», проанализируйте отображенные на мониторе компьютера механическую характеристику и временные зависимости тока статорной обмотки, электромагнитного момента, частоты вращения синхронного двигателя при пуске его в ход.
- Снятие угловых характеристик  $P=f(\delta)$ ,  $Q=f(\delta)$ ,  $U=f(\delta)$  синхронного двигателя

### **Описание электрической схемы соединений**

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

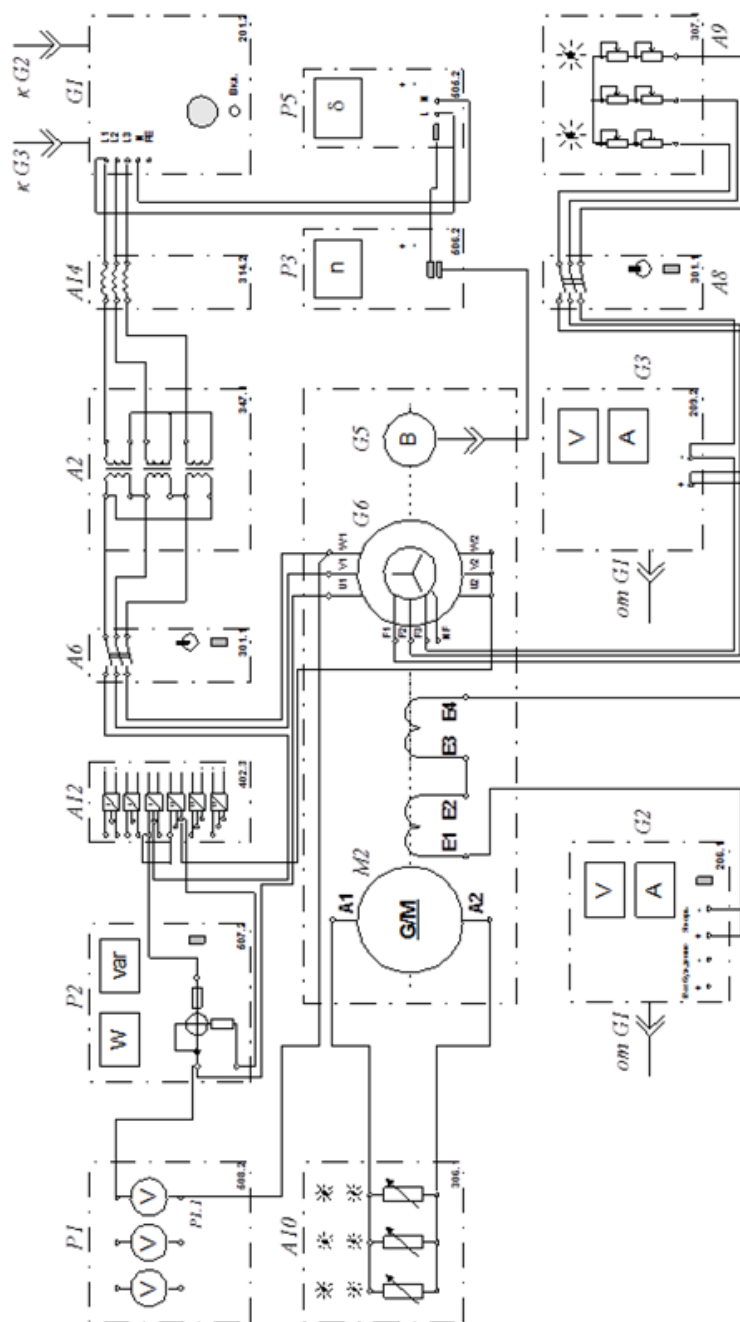
Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания регулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока G4, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением.

Активная нагрузка А10 используется для нагружения генератора G4.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока М1, работающей в режиме синхронного двигателя.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения Р3 электромашинного агрегата.

С помощью измерителя Р2 контролируются потребляемая активная и потребляемая (развиваемая) реактивная мощности, испытуемым двигателем М1.



С помощью указателя Р5 контролируется угол нагрузки синхронного двигателя



## Указания по проведению эксперимента

- Осуществите пуск в ход синхронного двигателя М1 в соответствии с указаниями по проведению эксперимента раздела 6.1 настоящего руководства (без включения источника G2).
- Включите выключатели "СЕТЬ" блока мультиметров Р1 и указателя угла нагрузки Р5.
- Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.
- Регулировочную рукоятку источника G2 поверните против часовой стрелки до упора.
- Регулировочные рукоятки нагрузки А10 установите в положение "100%".
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2 , изменяйте угол нагрузки  $\delta$  двигателя М1 в диапазоне  $0...85^\circ$  и заносите показания указателя Р5 (угол нагрузки  $\delta$ ), ваттметра (активная мощность  $P_1$ , потребляемая одной фазой двигателя М1) и варметра (реактивная мощность  $Q_1$ , потребляемая одной фазой двигателя М1) измерителя мощностей Р2 и мультиметра (линейное напряжение  $U$  двигателя М1) блока Р1 в таблицу 1.2.1.

Таблица 1.2.1

[illegible]

- В случае перехода двигателя М1 в асинхронный режим работы разгружайте его по активной мощности, вращая регулировочную рукоятку источника G2 против часовой стрелки до тех пор, пока не восстановится синхронная работа двигателя М1 с сетью.
- По завершении эксперимента нажмите кнопку «ОТКЛ.» источника G1 и отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Используя данные табл. 1.2.1, вычислите для каждого значения угла  $\delta$  и занесите в табл. 1.2.2 полные активную  $P=3P_1$  и реактивную  $Q=3Q_1$ , потребляемые двигателем М1.

Таблица 1.2.2

[illegible]

- Используя данные табл. 1.2.1 и 1.2.2, постройте искомые угловые характеристики  $P=f(\delta)$ ,  $Q=f(\delta)$ ,  $U=f(\delta)$  трехфазного синхронного двигателя.

*Снятие U-образной характеристики  $I=f(I_f)$  трехфазного синхронного двигателя*

### **Описание электрической схемы соединений**

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания регулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока G4, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением.

Активная нагрузка A10 используется для нагружения генератора G4.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока M1, работающей в режиме синхронного двигателя.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Машина (синхронный двигатель) M1 получает питание от источника G1 через трехфазную трансформаторную группу A2 и выключатель A6.

Реостат A9 выполняет роль резистора синхронизации и подключается выключателем A8 к обмотке возбуждения синхронного двигателя M1 на этапе пуска последнего.

С помощью линейного реактора моделируется сопротивление кабеля, питающего двигатель M1.

С помощью мультиметра блока P1 контролируется линейное напряжение статорной обмотки двигателя M1.

С помощью измерителя P2 контролируется активная мощность, потребляемая испытуемым двигателем M1.

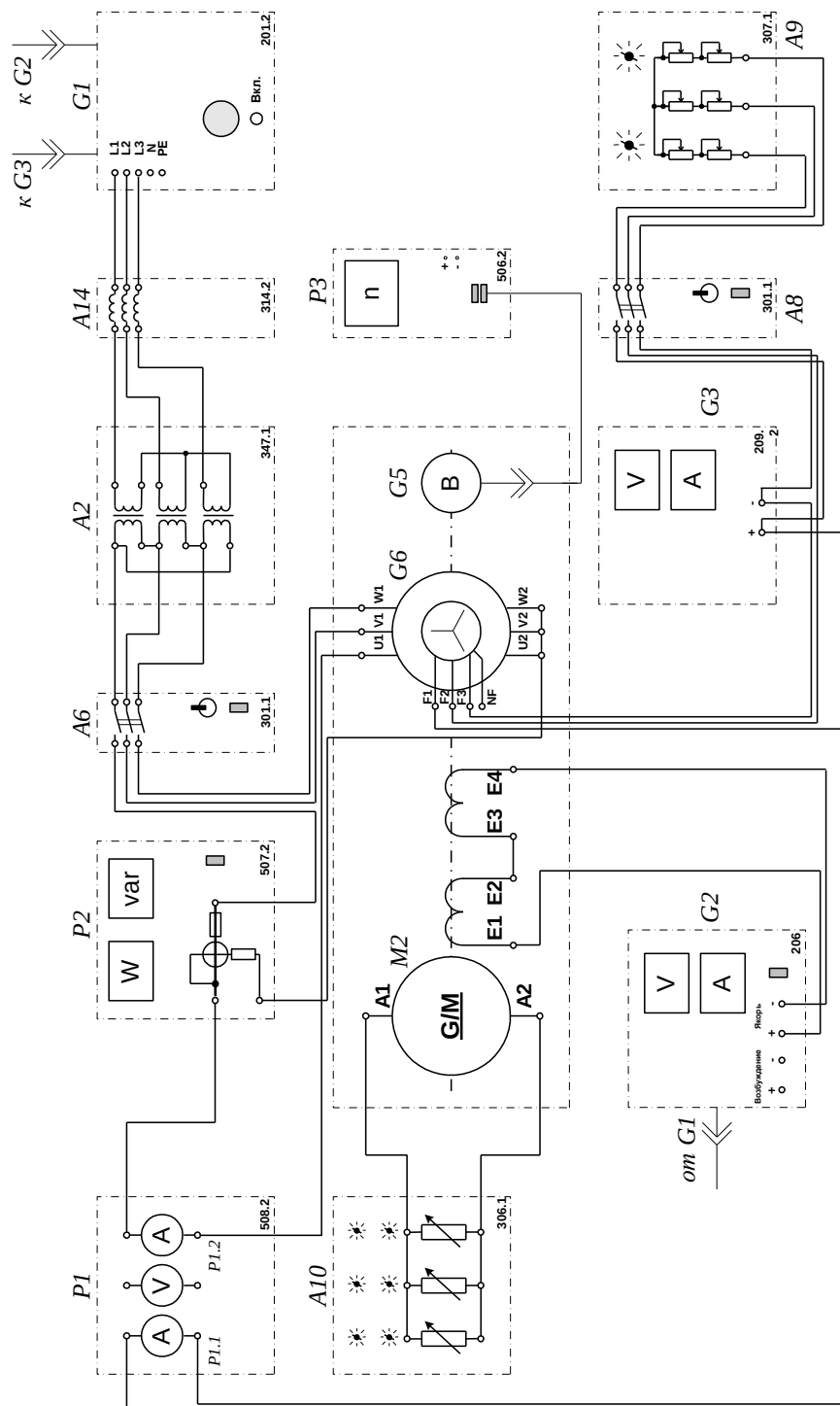


Рисунок 9.8-Электрическая схема соединений

### Указания по проведению эксперимента

- Осуществите пуск в ход синхронного двигателя M1 в соответствии с указаниями по проведению эксперимента раздела 6.1 настоящего руководства (без включения источника G2).
- Регулировочную рукоятку источника G2 поверните против часовой стрелки до упора.
- Регулировочные рукоятки нагрузки A10 установите в положение "100%".

- Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров Р1.
- Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, установите полную активную мощность, потребляемую двигателем М1 из сети, например, 60 Вт (определяется утроением показаний ваттметра измерителя Р2) и поддерживайте её в ходе эксперимента неизменной.
- Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, изменяйте ток возбуждения  $I_f$  (в диапазоне до 2 А) двигателя М1 и записывайте показания амперметров Р3.2 (ток  $I_f$ ) и Р3.3 (ток  $I$  статорной обмотки двигателя) в таблицу 1.3.

Таблица 1.3

|          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $I_f, A$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $I, A$   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- В случае перехода двигателя М1 в асинхронный режим работы разгружайте его по активной мощности, вращая регулировочную рукоятку источника G2 против часовой стрелки до тех пор, пока не восстановится синхронная работа двигателя М1 с сетью.
- По завершении эксперимента нажмите кнопку «ОТКЛ.» источника G1 и отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Используя данные табл. 1.3, постройте искомую U–образную характеристику  $I=f(I_f)$  трехфазного синхронного двигателя.

### Контрольные вопросы

1. Поясните способ использования обмоток СД по назначению.
2. Какие механические характеристики СД рассчитываются и используются для управления СД?
3. Как влияет величина пускового сопротивления в цепи ОВ на пусковой и подсинхронный моменты?
4. Поясните схемы пуска СД, отметив их достоинства и недостатки.
5. Как СД можно использовать для компенсации реактивной мощности индуктивного характера в сети?

## **5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

#### **5.1.2 Перечень основной литературы:**

1. Игнатович В.М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2013. — 182 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34738.html>
2. Дробов А.В. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Дробов, В.Н. Галушко. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2015. — 292 с. — 978-985-503-540-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67795.html>

#### **5.1.3 Перечень дополнительной литературы:**

1. Электрические машины [Электронный ресурс] : сборник задач / В. И. Парамонова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московская государственная академия водного транспорта, 2015. — 72 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46905.html>

### **5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

1. Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Электрические машины».
2. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электрические машины».
3. Методические указания по организации и проведению самостоятельной работы по дисциплине «Электрические машины».

### **5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины**

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

## Приложение А

### *Указание по технике безопасности*

До начала работы студенты обязаны изучить правила техники безопасности при работе с электроустановками. Об изучении правил техники безопасности и получении инструктажа студенты расписываются в специальном журнале. Студенты, не изучившие правила техники безопасности и не прошедшие инструктаж, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Учебная группа (или подгруппа) разбивается на бригады, число которых указывается преподавателем, а состав бригад комплектуется студентами на добровольных началах. Список группы (подгруппы), разбитой на бригады, староста предоставляет преподавателю, ведущему лабораторные занятия.

Каждая из бригад выполняет лабораторную работу в соответствии с графиком, находящемся в лаборатории.

Перед каждым занятием студент обязан подготовиться к выполнению лабораторной работы по данному методическому пособию и рекомендуемой литературе. Перед началом работы преподаватель проверяет знания студентов по содержанию выполняемой работы. Плохо подготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Работая в лаборатории, необходимо соблюдать следующие правила:

К выполнению лабораторной работы следует приступать только после полного уяснения ее содержания и получения допуска к ней.

2. Начинать работу следует с ознакомления с приборами и оборудованием, применяемыми в данной работе.

3. На лабораторном столе должны находиться только предметы, необходимые для выполнения данной работы.

4. Расположение аппаратуры на рабочем столе должно быть таким, чтобы схема соединений получилась наиболее простой, наглядной и работа с аппаратурой была удобной.

5. Желательно, чтобы схему собирал один из членов бригады, а другие контролировали.

6. При сборке сложных схем следует вначале соединить главную, последовательную цепь, начиная сборку от одного зажима источника тока и заканчивая на другом, а затем уже подключить параллельные цепи.

7. После того, как схема будет собрана, необходимо убедиться в правильной установке движков реостатов, автотрансформаторов и рукояток других регулирующих устройств.

8. Собранная схема обязательно должна быть проверена преподавателем или старшим лаборантом и только с их разрешения может быть включена под напряжение.

9. При включении схемы особое внимание следует обратить на показания амперметров и других измерительных приборов. В случае резкого движения стрелки амперметра к концу шкалы схему необходимо немедленно отключить от источника напряжения.

10. Необходимо бережно относиться к аппаратуре, используемой в работе. Обо всех замеченных неисправностях или повреждениях студент должен немедленно сообщить преподавателю или лаборанту.

11. После выполнения работы студент обязан, не разбирая схемы показать полученные данные преподавателю. Если результаты измерений верны, то преподаватель их подписывает. Эксперимент с неправильными результатами следует повторить.

12. Схему следует разбирать только после ее отключения от сети.

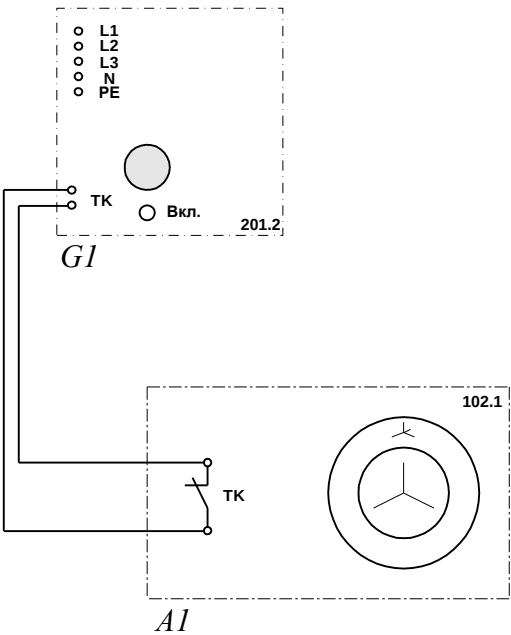
13. Категорически запрещается:

- трогать руками оголенные провода и части приборов, находящиеся под напряжением, даже если оно невелико;
- производить изменения в схеме при подключенном источнике питания;
- заменять или брать оборудование, или приборы с других рабочих мест
- без разрешения преподавателя или лаборанта;
- отходить от приборов и машин, находящихся под напряжением или оставлять схему под напряжением при обработке результатов измерений;
- перегружать приборы током или напряжением, превышающим номинальное значение.

Проверку наличия, подаваемого к схеме или элементам схемы напряжения необходимо производить только контрольной лампочкой или вольтметром, соблюдая правила техники безопасности.

При работе в лаборатории следует строго соблюдать меры предосторожности, так как электрический ток, проходящий через тело человека, величиной в 0,025 А уже является опасным для жизни.

Электрическая схема соединений тепловой защиты машины  
переменного тока



Перечень аппаратуры

| Обозначение | Наименование                | Тип   | Параметры                                    |
|-------------|-----------------------------|-------|----------------------------------------------|
| A1          | Машина переменного тока     | 102.1 | 100 Вт / 230 В ~ /<br>1500 мин <sup>-1</sup> |
| G1          | Трехфазный источник питания | 201.2 | 400 В ~ / 16 А                               |



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

## **Методические указания**

по выполнению практических работ  
по дисциплине «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ»

для студентов направления подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

## Содержание

| №<br>п/п | Стр.                                                                                                                                                                                                          |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          | Введение                                                                                                                                                                                                      |
| 1.       | Цель и задачи изучения дисциплины                                                                                                                                                                             |
| 2.       | Оборудование и материалы                                                                                                                                                                                      |
| 3.       | Наименование практических работ                                                                                                                                                                               |
| 4.       | Содержание практических работ                                                                                                                                                                                 |
| 4.1      | Практическая работа № 1. Трансформаторы. Электромагнитные процессы в трансформаторе при холостом ходе.                                                                                                        |
| 4.2      | Практическая работа № 2. Режимы работы однофазного трансформатора. Работа трансформатора под нагрузкой.                                                                                                       |
| 4.3.     | Практическая работа №3. Трехфазные трансформаторы. Схемы и группы соединения трёхфазного трансформатора.                                                                                                      |
| 4.4      | Практическая работа №4. Режимы работы трехфазного трансформатора. Трансформация трехфазных токов.                                                                                                             |
| 4.5      | Практическая работа №5. Переходные процессы в трансформаторе. Экспериментальное определение параметров и потерь трансформатора.                                                                               |
| 4.6      | Практическая работа №6. Магнитная цепь машины постоянного тока. Магнитное поле взаимной индукции многофазной обмотки машины постоянного тока. Способы подавления высших гармоник ЭДС машины постоянного тока. |
| 4.7      | Практическая работа №7. Обмотки якоря машин постоянного тока. Расчет и построение якорной обмотки машины постоянного тока.                                                                                    |
| 4.8      | Практическая работа №8. Параметры и режимы работы машин постоянного тока. Расчет магнитной цепи машины при холостом ходе и нагрузке.                                                                          |
| 4.9      | Практическая работа №9. Параметры и режимы работы машин постоянного тока. Режимы работы машины постоянного тока.                                                                                              |
| 4.10     | Практическая работа №10. Магнитодвижущие силы обмоток и магнитные поля машин переменного тока. Электромагнитные процессы в асинхронных машинах при холостом ходе.                                             |
| 4.11     | Практическая работа №11. Электромагнитный момент и круговая диаграмма асинхронной машины. Электромагнитные процессы в асинхронных машинах при нагрузке.                                                       |

- 4.12 Практическая работа №12. Электромагнитный момент и круговая диаграмма асинхронной машины. Потери, КПД асинхронного двигателя.
- 4.13 Практическая работа №13. Принцип действия и рабочий процесс трехфазной асинхронной машины. Механическая характеристика асинхронного двигателя.
- 4.14 Практическая работа №14. Пуск в ход трехфазных асинхронных двигателей. Однофазный асинхронный двигатель.
- 4.15 Практическая работа №15. Пуск в ход трехфазных асинхронных двигателей. Пусковые свойства асинхронного двигателя.
- 4.16 Практическая работа №16. Регулирование частоты вращения и особые режимы работы асинхронных машин. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя.
- 4.17 Практическая работа №17. Магнитное поле синхронной машины. Электромагнитные процессы в синхронной машине.
- 4.18 Практическая работа №18. Параметры синхронных машин. Построение векторных диаграмм синхронного генератора.
- 5 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины
  - 5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины
  - 5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине
  - 5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

## Введение

Практические занятия создают оптимальные дидактические условия для деятельностного освоения студентами содержания и методологии изучаемой дисциплины. Практические занятия занимают преимущественное место при изучении общепрофессиональных и профессиональных дисциплин. Практические занятия проводятся с целью выработки практических умений и приобретения навыков в решении задач, отработки упражнений, выполнении чертежей, производстве расчётов и т.п.

Целью практических занятий является формирование практических умений – профессиональных (выполнять определённые действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности) или учебных, необходимых в последующей учебной деятельности по общепрофессиональным и профессиональным дисциплинам.

Библиографический список содержит сведения о справочной литературе и дополнительных изданиях, необходимых для углубленного изучения отдельных вопросов.

## ***1. Цель и задачи изучения дисциплины***

Дисциплина «Электрические машины» изучается студентами, обучающимися по направлению подготовки бакалавриата «13.03.02 Электроэнергетика и электротехника». Целью изучения дисциплины является ознакомление студентов с основами теории и эксплуатационными характеристиками электрических машин и трансформаторов, а также теоретической базы и знаний в области электромеханического и статистического преобразования энергии, принципа действия основных видов электрических машин и трансформаторов и особенностей их применения.

Исходя из поставленных целей, задачами изучения дисциплины являются:

- получение практических навыков эксплуатации, и проектирования электрических машин в составе объектов электроэнергетики;
- знание материалов, применяемых при производстве генераторов и электрических двигателей;
- умение предотвращения аварии и выхода из строя электрической машины;
- умение принимать и обосновывать конкретные технические решения конструирования электроэнергетического оборудования.

## ***2. Оборудование и материалы***

Аппаратные средства: переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения.

## ***3. Наименование практических работ***

Для заочной формы обучения предусмотрены следующие практические работы: Практическая работа №3. Трёхфазные трансформаторы. Схемы и группы соединения трёхфазного трансформатора – 2 часа; Практическая работа №9. Параметры и режимы работы машин постоянного тока. Режимы работы машины постоянного тока – 2 часа; Практическая работа №12. Электромагнитный момент и круговая диаграмма асинхронной машины. Потери, КПД асинхронного двигателя – 2 часа, практическая подготовка – 2 часа; Практическая работа №16. Регулирование частоты вращения и особые режимы работы асинхронных машин. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя – 2 часа; Практическая работа №18. Параметры синхронных машин. Построение векторных диаграмм синхронного генератора – 2 часа.

| № Темы дисциплины | Наименование тем дисциплины, их краткое содержание                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Объем часов | Из них практическая подготовка, часов |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------|
| 4 семестр         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |             |                                       |
| 1                 | <b>Практическая работа № 1. Трансформаторы.</b> Электромагнитные процессы в трансформаторе при холостом ходе.<br>Изучить электромагнитные процессы холостого хода трансформатора.                                                                                                                                                                                                       | 2           | —                                     |
| 2                 | <b>Практическая работа № 2. Режимы работы однофазного трансформатора.</b> Работа трансформатора под нагрузкой.<br>Изучить работу нагруженного трансформатора.                                                                                                                                                                                                                           | 2           | —                                     |
| 3                 | <b>Практическая работа №3. Трехфазные трансформаторы.</b> Схемы и группы соединения трёхфазного трансформатора.<br>Изучить соединения трёхфазного трансформатора звездой и треугольником.                                                                                                                                                                                               | 2           | —                                     |
| 4                 | <b>Практическая работа №4. Режимы работы трехфазного трансформатора.</b> Трансформация трехфазных токов.<br>Изучение трансформации оков в трёхфазной системе.                                                                                                                                                                                                                           | 2           | —                                     |
| 5                 | <b>Практическая работа №5. Переходные процессы в трансформаторе.</b> Экспериментальное определение параметров и потерь трансформатора.<br>Научиться рассчитывать параметры трансформатора и определять потери.                                                                                                                                                                          | 2           | —                                     |
| 6                 | <b>Практическая работа №6. Магнитная цепь машины постоянного тока.</b> Магнитное поле взаимной индукции многофазной обмотки машины постоянного тока. Способы подавления высших гармоник ЭДС машины постоянного тока.<br>Расчёт магнитного поля взаимной индукции многофазной обмотки машины постоянного тока. Изучение способов подавления высших гармоник ЭДС машины переменного тока. | 2           | —                                     |
| 7                 | <b>Практическая работа №7. Обмотки якоря машин постоянного тока.</b> Расчет и построение якорной обмотки машины постоянного тока.<br>Научиться рассчитывать построение якорной обмотки машины постоянного тока                                                                                                                                                                          | 2           | —                                     |
| 8                 | <b>Практическая работа №8. Параметры и режимы работы машин постоянного тока.</b> Расчет магнитной цепи машины при холостом ходе и нагрузке.<br>Научиться расчёту магнитной цепи машины при холостом ходе и нагрузке.                                                                                                                                                                    | 2           | —                                     |

|                            |                                                                                                                                                                                                                                                        |           |   |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---|
| 9                          | <b>Практическая работа №9. Параметры и режимы работы машин постоянного тока.</b><br>Режимы работы машины постоянного тока.<br>Изучить режимы работы машин постоянного тока.                                                                            | 2         | — |
| <b>Итого за 4 семестр:</b> |                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>18</b> | — |
| <b>5 семестр</b>           |                                                                                                                                                                                                                                                        |           |   |
| 19                         | <b>Практическая работа №10. Магнитодвижущие силы обмоток и магнитные поля машин переменного тока.</b> Электромагнитные процессы в асинхронных машинах при холостом ходе.<br>Изучить электромагнитные процессы в асинхронных машинах при холостом ходе. | 4         | 2 |
| 20                         | <b>Практическая работа №11. Электромагнитный момент и круговая диаграмма асинхронной машины.</b> Электромагнитные процессы в асинхронных машинах при нагрузке.<br>Изучить электромагнитные процессы в асинхронных машинах при нагрузке.                | 4         | — |
| 21                         | <b>Практическая работа №12. Электромагнитный момент и круговая диаграмма асинхронной машины.</b> Потери, КПД асинхронного двигателя.<br>Научиться расчёту потерь и КПД асинхронного двигателя.                                                         | 4         | — |
| 22                         | <b>Практическая работа №13. Принцип действия и рабочий процесс трехфазной асинхронной машины.</b> Механическая характеристика асинхронного двигателя.<br>Научиться рассчитывать механическую характеристику асинхронного двигателя.                    | 4         | — |
| 23                         | <b>Практическая работа №14. Пуск в ход трехфазных асинхронных двигателей.</b> Однофазный асинхронный двигатель.<br>Изучить строение и характеристики однофазного асинхронного двигателя.                                                               | 4         | — |
| 24                         | <b>Практическая работа №15. Пуск в ход трехфазных асинхронных двигателей.</b> Пусковые свойства асинхронного двигателя.<br>Расчёт пусковых характеристик АД.                                                                                           | 4         | — |
| 25                         | <b>Практическая работа №16. Регулирование частоты вращения и особые режимы работы асинхронных машин.</b> Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя.<br>Изучить решения по регулированию частоты вращения асинхронного двигателя.           | 4         | — |
| 26                         | <b>Практическая работа №17. Магнитное поле синхронной машины.</b> Электромагнитные процессы в синхронной машине.<br>Расчёт электромагнитных процессов в син-                                                                                           | 4         | 2 |

|                           |                                                                                                                                                                                    |           |   |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---|
|                           | хронной машине.                                                                                                                                                                    |           |   |
| 27                        | <b>Практическая работа №18. Параметры синхронных машин.</b> Построение векторных диаграмм синхронного генератора.<br>Научиться строить векторные диаграммы синхронного генератора. | 4         | 2 |
| <b>Итого за 5 семестр</b> |                                                                                                                                                                                    | <b>36</b> | — |
| <b>Итого</b>              |                                                                                                                                                                                    | <b>54</b> | — |



#### 4. Содержание практических работ

##### Практическая работа № 1. Трансформаторы. Электромагнитные процессы в трансформаторе при холостом ходе.

**Цель занятия:** Изучить электромагнитные процессы в трансформаторе при холостом ходе.

##### Основы теории:

Под холостым ходом трансформатора понимают такой режим его работы, при котором к зажимам первичной обмотки приложено напряжение, а вторичная обмотка разомкнута. Холостой ход – это предельный режим работы, позволяющий определить такие важные величины как: коэффициент трансформации, ток холостого хода трансформатора, потери при холостом ходе трансформатора.

Пусть к зажимам первичной обмотки трансформатора приложено гармоническое напряжение,

$$u_1 = \sqrt{2} U_1 \sin \omega t; \quad (1.1)$$

под действием которого по обмотке течёт ток  $i_0$ . Этот ток создаёт намагничивающую силу  $i_0 w_1$ , где  $w_1$  – число последовательно соединённых между собой витков первичной обмотки. Н.с. первичной обмотки вызывает появление магнитного потока. Этот поток имеет несколько составляющих:  $\Phi_0$  – основной поток, составляющий большую часть суммарного потока, замыкается по сердечнику и сцепляется с обеими обмотками;  $\Phi_{\sigma 1}$  поток рассеяния первичной обмотки, замыкается вне сердечника, сцепляется только с первичной (возможно частично со вторичной) обмоткой.

Первичная обмотка подводит напряжение, а вторичная обмотка разомкнута, то есть вторичный ток равен нулю.

Поток  $\Phi_0$  наводит в первичной обмотке основную ЭДС,  $e_1$  и во вторичной –  $e_2$ . Поток  $\Phi_{\sigma 1}$  – создаёт в первичной обмотке ЭДС рассеяния  $e_{\sigma 1}$ .

Поскольку по первичной обмотке течёт ток  $i_0$ , то на активном её сопротивлении  $r_1$  имеет место падение напряжения  $i_0 r_1$ . Согласно второму закону Кирхгофа, в векторной форме можно записать:

$$\vec{U}_1 = \vec{E}_1 + \vec{E}_{\sigma 1} + \vec{I}_0 r_1; \quad (1.2)$$

В трансформаторах обычной конструкции поток рассеяния при холостом ходе ( $P_{\sigma 1} \approx 0$ ) мал,  $r_1$  тоже мало и  $\vec{I}_0 r_1 \approx \vec{E}_{\sigma 1}$  обычно не превышает 5% от  $\vec{U}_1$ . Поэтому в первом приближении этой разностью можно пренебречь.

Тогда уравнение (1.2) имеет вид :

$$U_1 \approx E_1 ; \quad 1.3)$$

то есть при холостом ходе напряжение, подведённое к обмотке трансформатора, практически уравнивается только ЭДС, создаваемой в этой обмотке основным магнитным потоком.

Выражение (1.4) является основным в теории трансформаторов для расчёта действующего значения ЭДС.

$$E_1 \approx 4,44 f w_1 \Phi_m \quad 1.4)$$

Вторичная обмотка пронизывается тем же потоком  $\Phi_m$ , поэтому действующее значение ЭДС вторичной обмотки, аналогично уравнению (1.4), можно записать в виде:

$$E_2 \approx 4,44 f w_2 \Phi_m . \quad 1.5)$$

Отношение  $E_1$  к  $E_2$  называется коэффициентом трансформации трансформатора:

$$k \approx E_1 / E_2 \approx w_1 / w_2 . \quad 1.6)$$

Мощность  $P_0$ , потребляемая трансформатором в режиме х.х. расходуется только на потери в стали.

### Контрольные вопросы и задания:

1. Какие параметры трансформатора позволяет определить такой режим работы, как холостой ход?
2. Как определить действующее значение ЭДС трансформатора?
3. Что такое коэффициент трансформации, как его определить?
4. На что расходуется мощность, потребляемая трансформатором при холостом ходе?

### Задачи

1. Определить номинальный ток вторичной обмотки  $I_{2H}$  однофазного трансформатора, если номинальная мощность  $S_H = 20$  кВА, номинальное напряжение первичной обмотки  $k = 15$ .  $U_{1H} = 10$  кВ, коэффициент трансформации
2. Определить номинальную мощность трехфазного трансформатора  $S_H$  и номинальный ток первичной обмотки  $I_{1H}$ , если номинальное напряжение первичной обмот-

ки  $U_{1H} = 20$  кВ, номинальное напряжение вторичной обмотки  $U_{2H} = 0.4$  кВ, номинальный ток вторичной обмотки  $I_{2H} = 150$  А. Найти действующие значения ЭДС в обмотках  $E_1$  и  $E_2$ , если максимальный магнитный поток  $\Phi_{\max} = 0.02$  Вб, частота тока  $f = 50$  Гц, числа витков первичной и вторичной обмоток соответственно  $W_1 = 100$ ,  $W_2 = 50$ .

3. Максимальный магнитный поток в сердечнике однофазного трансформатора  $\Phi_{\max} = 0.02$  Вб, число витков первичной обмотки  $W_1 = 500$ . Определить коэффициент трансформации  $k$  и подведенное напряжение  $U_1$ , если напряжение на зажимах вторичной обмотки в режиме холостого хода  $U_{20} = 127$  В, частота напряжения сети  $f = 50$  Гц.

4. Трансформатор включен в сеть переменного тока промышленной частоты. Индуктивность рассеяния первичной обмотки  $L_{\sigma 1} = 0.001$  Гн. Определить индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки  $x_{\sigma 1}$ .

## Практическая работа № 2. Режимы работы однофазного трансформатора.

### Работа трансформатора под нагрузкой.

**Цель занятия.** Изучить работу нагруженного трансформатора.

#### Основы теории:

В паспорте трехфазных трансформаторов дается номинальная мощность и мощность потерь всех трех фаз; под номинальными напряжениями понимаются линейные напряжения на зажимах трансформатора в режиме холостого хода, а под номинальными токами — линейные токи независимо от схемы соединения обмоток.

Полная мощность трехфазного двухобмоточного трансформатора, В•А,

$$S_{\text{н}} = \sqrt{3} U_{1\text{н}} * I_{1\text{н}} \quad 2.1)$$

Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения, равное отношению числа витков этих обмоток, называется коэффициентом трансформации:

$$k = E_{1\text{н}} / E_{2\text{н}} = w_1 / w_2 \quad 2.2)$$

Трансформатор, у которого параметры вторичной цепи приведены к числу витков первичной обмотки  $w_1$ , называется приведенным трансформатором. Такому трансформатору соответствует электрическая схема замещения (рис. 2.1) и основные уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 Z_1 = (-\dot{E}_1); \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 = \dot{E}'_2 - j \dot{I}'_2 x'_2 - \dot{I}'_2 r'_2 \end{aligned} \quad 2.3)$$

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2)$$

Индуктивные сопротивления первичной  $x_1$  и вторичной  $x_2$  обмоток обусловлены потоками рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  и  $\Phi_{\sigma 2}$ .

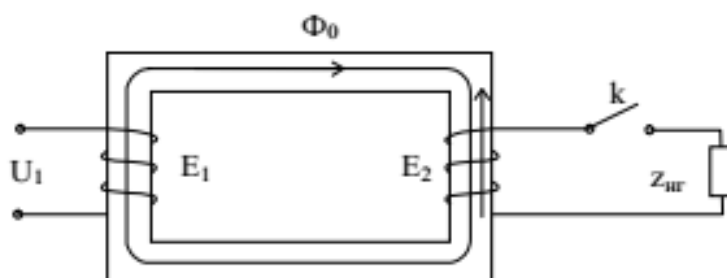


Рисунок 2.1 – Схема замещения трансформатора

Формулы приведения параметров вторичной цепи:

ток вторичной обмотки

$$I_2' = I_2 * k \quad (2.6)$$

ЭДС и напряжение вторичной

$$E_2' = E_2 * k, U_2' \approx U_2 * k \quad (2.7)$$

активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки

$$r_2' = r_2 * k^2, x_2' = x_2 * k^2 \quad (2.8)$$

полное сопротивление вторичной обмотки

$$z_2' = z_2 * k^2 \quad (2.9)$$

полное сопротивление нагрузки

$$z_H' = z_H * k^2 \quad (2.10)$$

При изменении нагрузки трансформатора в широком диапазоне (от холостого хода до номинального режима) магнитный поток может считаться практически постоянным и равным магнитному потоку в режиме холостого хода. Это в свою очередь определяет постоянство потерь в стали, которые легко определяются из режима холостого хода.

В режиме «нормального» короткого замыкания магнитный поток в сердечнике трансформатора настолько мал, что им можно пренебречь, а следовательно, при этом режиме потери в стали трансформатора практически равны нулю, а потери в меди (в обмотках трансформатора) равны потерям при номинальной нагрузке трансформатора. Величины токов, напряжений и мощностей, полученные из режимов холостого хода и «нормального» короткого замыкания, позволяют определить основные параметры трансформатора.

Сопротивление короткого замыкания трансформатора

полное

$$z_K = U_{K\Phi} / I_{K\Phi} \quad (2.11)$$

активное

$$r_K = P_K / 3 * I_K^2 \quad (2.12)$$

реактивное

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2} \quad (2.13)$$

Сопротивления первичной обмотки

$$r_1 = r'_2 = r_k/2 \quad (2.14)$$

$$x_1 = x'_2 = x_k/2 \quad (2.15)$$

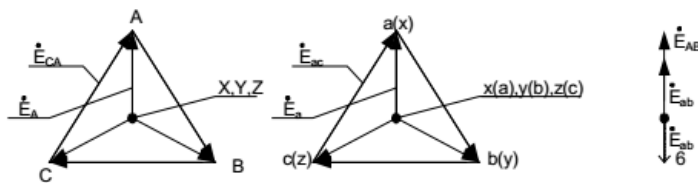
Сопротивления вторичной обмотки

$$r_2 = r'_2/k^2 \quad (2.16)$$

$$x_2 = x'_2/k^2 \quad (2.17)$$

Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания

$$(2.18)$$



$$u_{кр} = u_k * \sin \varphi_k \quad (2.19)$$

Коэффициент мощности короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = P_k / \sqrt{3} * U_k * I_k \quad (2.20)$$

Максимальное значение магнитного потока находится по формуле:

$$\Phi_m = B_m * Q_{ct} * k_c \quad (2.21)$$

где  $B_m$  – максимальное значение магнитной индукции в стержне магнитопровода,

$Q_{ct}$  – площадь поперечного сечения магнитопровода,

$k_c$  – коэффициент заполнения магнитопровода сталью.

КПД трансформатора при любой нагрузке определяется выражением:

$$\eta = \frac{\beta * S_H \cos \varphi_2}{\beta * S_H \cos \varphi_2 + P_{0H} + \beta^2 P_{KH}} \quad (2.21)$$

где  $P_{0H}$  – мощность холостого хода при номинальном напряжении,

$P_{KH}$  – мощность КЗ при номинальных токах в обмотках трансформатора.

Электрические потери в обмотках трансформатора при номинальной нагрузке можно определить, если известны значения активных сопротивлений и токов обмоток трансформатора:

$$P_{эм} = P_{э1} + P_{э2} = m I_1^2 r_1 + m I_2^2 r_2 \quad (2.23)$$

Наибольший КПД соответствует коэффициенту нагрузки:

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{кн}}}} \quad (2.24)$$

Тогда формула для КПД принимает вид:

$$\eta_{\text{max}} = \frac{\beta' S_H \cos \varphi_2}{\beta' S_H \cos \varphi_2 + 2P_{0H}} \quad (2.25)$$

*Пример 1.* Дан масляный трансформатор ТМ-25/10 с номинальными параметрами: номинальной мощностью  $S_{\text{ном}} = 25 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ , номинальным напряжением  $U_1 = 10 \text{ кВ}$ , номинальным током первичной обмотки  $I_1$ , напряжением КЗ  $U_k\% = 4,5$  и его активными и реактивными параметрами  $U_{ka}$  и  $U_{kr}$ , мощности холостого хода и КЗ  $P_0 = 0,13 \text{ кВт}$  и  $P_k = 0,6 \text{ кВт}$ , ток холостого хода  $I_0\% = 3,2$ , коэффициенты мощности холостого хода и КЗ  $\cos \varphi_k$  и  $\cos \varphi_x$ , Сопротивление КЗ  $Z_k$ , и его активная и реактивная части  $r_k$  и  $x$ , его номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки  $\Delta U_{\text{ном}}\%$  (индуктивный характер). Соединение трансформатора Y/Y. Определить неизвестные параметры трансформатора.

*Решение:*

Номинальный ток в первичной обмотке

$$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H}} = \frac{25}{1,73 \cdot 10} = 1,44 \text{ А}$$

Ток холостого тока

$$I_0 = \frac{I_0}{I_{1H}} = \left( \frac{3,2}{100} \right) \cdot 1,44 = 0,46 \text{ А}$$

Коэффициент мощности Холостого тока

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} I_0 \cdot U_{1H}} = \frac{0,13}{1,73 \cdot 0,46 \cdot 10} = 0,16$$

Напряжение Короткого замыкания

$$U_k = \frac{\left( \frac{U_k}{100} \right) U_{1H}}{\sqrt{3}} = \frac{\left( \frac{4,5}{100} \right) 10}{1,73} = 0,26 \text{ кВ}$$

Коэффициент мощности Короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{3 I_{1H} \cdot U_k} = \frac{0,6}{3 \cdot 1,44 \cdot 0,26} = 0,53$$

$$\sin \varphi_k = 0,85$$

Активная и реактивная составляющие напряжения Короткого замыкания

$$U_{ka} = U_k \cos \varphi_k = 4,5 \cdot 0,53 = 2,38\%$$

$$U_{кр} = U_k \sin \varphi_k = 4,5 * 0,85 = 3,8\%$$

Сопротивление короткого замыкания

$$Z_k = \frac{U_k}{I_{1н}} = 0,26 * \frac{10^3}{1,44} = 180 \text{ Ом}$$

Активная и индуктивная составляющие сопротивления короткого замыкания

$$r_k = Z_k \cos \varphi_k = 180 * 0,53 = 95,4 \text{ Ом}$$

$$x_k = Z_k \sin \varphi_k = 180 * 0,85 = 153 \text{ Ом}$$

Номинальное изменение напряжения трансформатора при сбросе нагрузки

$$\Delta U_{н\%} = U_{ка} \cos \varphi_2 + U_{кр} \sin \varphi_2 = 2,38 * 0,8 + 3,8 * 0,6 = 4,18\%$$

*Пример 2.* Технические данные трехфазного трансформатора ТМ-630/10: номинальная мощность  $S_{ном}=630 \text{ кВ*А}$ , номинальные первичное  $U_{1н}=10\text{кВ}$  и вторичное  $U_{2ном}=0,4\text{кВ}$  напряжения, напряжение короткого замыкания  $U_k=5,5\%$  мощность короткого замыкания  $P_{кн}=7,6 \text{ кВт}$  мощность холостого хода  $P_{0н}=1,56 \text{ кВт}$ , ток холостого хода  $i_0=2,0$ . Определить необходимые параметры и построить треугольник короткого замыкания (обмотки соединены Y/Y; параметры приведены к рабочей температуре).

*Решение:*

Напряжение короткого замыкания

$$U_{1к} = U_k / 10^2 * U_{ном} = 5,5 / 10^2 * 10 * 10^3 = 550 \text{ В}$$

Ток короткого замыкания

$$I_{1к} = I_{ном1} = S_{ном} / (\sqrt{3} * U_{1ном}) = \frac{630 * 10^3}{1,73 * 550} = 36,4 \text{ А}$$

Коэффициент мощности режима короткого замыкания

$$\cos \phi_k = \frac{P_{кн}}{\sqrt{3} U_{1н} * I_{к1}} = \frac{7600}{1,73 * 550 * 36,4} = 0,22$$

$$\phi_k = 77^\circ; \sin \phi_k = 0,97$$

Полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3} I_{1к}} = \frac{550}{\sqrt{3} * 36,4} = 8,7 \text{ Ом}$$

Активная составляющая сопротивления короткого замыкания

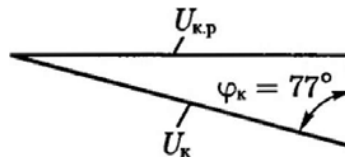
$$r_k = Z_k \cos \phi_k = 8,7 * 0,22 = 1,9 \text{ Ом}$$

Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$x_k = Z_k \sin \phi_k = 8,7 * 0,97 = 8,44 \text{ Ом}$$

Стороны треугольника напряжений короткого замыкания





$$U = I_{\text{к}} z_{\text{к}} = 36.4 * 8.7 = 317 \text{ В}$$

$$U_{\text{ка}} = I_{\text{к}} r_{\text{к}} = 36,4 * 1,9 = 69 \text{ В}$$

$$U_{\text{кр}} = I_{\text{к}} x_{\text{к}} = 36,4 * 8,44 = 307 \text{ В}$$

Принимаем масштаб напряжения  $m_v = 5 \text{ В/мм}$ , тогда длина векторов (сторон треугольника короткого замыкания):

$$U_{\text{к}} = \frac{317}{5} = 63 \text{ мм}$$

$$U_{\text{ка}} = \frac{69}{5} = 14 \text{ мм}$$

$$U_{\text{кр}} = \frac{307}{5} = 61 \text{ мм}$$

### Контрольные вопросы и задания:

1. Что такое внешняя характеристика трансформатора?
2. Для чего делается приведение параметров вторичной обмотки трансформатора к первичной?
3. Изменяется ли магнитный поток трансформатора при изменении его нагрузки?
4. Что такое коэффициент загрузки трансформатора?
5. Как определяются электрические потери в трансформаторе?
6. Как определяется изменение напряжения трансформатора?
7. Какие потери в трансформаторе не зависят от его нагрузки?
8. Зависят ли от нагрузки электрические потери в трансформаторе?

### Задачи

1. Трехфазный трансформатор имеет параметры, значения которых приведены в табл. 1.2.1: номинальная мощность  $S_{\text{ном}}$  и номинальные напряжения (линейные)  $U_{1\text{ном}}$  и  $U_{2\text{ном}}$ , напряжение короткого замыкания ток холостого хода  $\beta_0$ , потери холостого хода  $P_{\text{ном}}$  и потери короткого замыкания  $P_{\text{к1ном}}$ . Обмотки трансформатора соединены по схеме «звезда—звезда». Требуется определить: параметры Т-образной схемы замещения, считая ее симметричной ( $z = r_2'$  и  $x = x_2'$ ), а также фактические значения сопротивлений вторичной обмотки; величины КПД  $\eta$ , соответствующие значениям полной мощности трансформатора  $0,25S_{\text{ном}}$ ;  $0,5 S_{\text{ном}}$ ;  $0,75 S_{\text{ном}}$  и при коэффициентах мощности нагрузки  $\cos\varphi_2 = 0,8$  (индуктивный характер нагрузки) и  $\cos\varphi_2 = 1$ ; номинальное изменение напряжения  $\Delta U$ . Построить графики  $\eta = f(\beta)$  и  $U_2 = f(\beta)$ .

Таблица 2. 1– Исходные данные к задаче 1

| Параметры                       | Варианты |     |     |     |      |      |     |     |      |      |
|---------------------------------|----------|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|------|------|
|                                 | 1        | 2   | 3   | 4   | 5    | 6    | 7   | 8   | 9    | 10   |
| $S_n, \text{кВ} \cdot \text{А}$ | 100      | 180 | 320 | 560 | 1000 | 800  | 600 | 700 | 400  | 200  |
| $U_{1n}, \text{кВ}$             | 0,5      | 3,0 | 6,0 | 10  | 35   | 10   | 10  | 6,0 | 3,0  | 3,0  |
| $U_{2n}, \text{кВ}$             | 0,23     | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 3,0  | 0,4  | 0,6 | 0,6 | 0,23 | 0,23 |
| $U_k, \%$                       | 5,5      | 5,5 | 8,5 | 6,5 | 5,5  | 6,5  | 8,5 | 5,5 | 6,5  | 5,5  |
| $I_0, \%$                       | 6,5      | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,0  | 5,0  | 5,5 | 5,5 | 5,5  | 6,5  |
| $P_{0n}, \text{Вт}$             | 0,65     | 1,2 | 1,6 | 2,5 | 5,2  | 3,6  | 2,8 | 3,2 | 2,0  | 1,5  |
| $P_{кном} > \text{кВт}$         | 2,0      | 3,6 | 5,8 | 9,0 | 13,5 | 10,0 | 9,0 | 8,2 | 6,0  | 4,0  |

2. В таблице 2.2 приведены данные трехфазных силовых трансформаторов серии ТМ: полная поминальная мощность  $S_n$  номинальные потери холостого хода  $P_{0n}$  и короткого замыкания  $P_{кн}$  коэффициент мощности нагрузки  $\cos \varphi_2$ . Требуется определить величину снижения КПД при номинальной нагрузке по сравнению с его максимальным значением.

Таблица 2.2 – Исходные данные к задаче 2

| Тип трансформатора | $S_{ном} \text{ В А}$ | $P_{0ном} \text{ кВт}$ | $P_{кном}, \text{ кВт}$ | $\cos \varphi_2$ |
|--------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|------------------|
| ТМ-100/35          | 100                   | 0,465                  | 1,97                    | 0,8              |
| ТМ-160/35          | 160                   | 0,70                   | 2,65                    | 0,85             |
| ТМ-250/35          | 250                   | 10                     | 3,70                    | 0,85             |
| ТМ-400/35          | 400                   | 1,35                   | 5,50                    | 0,8              |
| ТМ-630/35          | G30                   | 100                    | 7,60                    | 0,75             |
| ТМ-1000/35         | 1000                  | 2,75                   | 12,2                    | 0,70             |
| ТМ-1600/35         | 1G00                  | 3,65                   | 18,0                    | 0,8              |
| ТМ-2500/35         | 2500                  | 5,10                   | 25,0                    | 0,75             |
| ТМ-4000/35         | 4000                  | 6,70                   | 33,5                    | 0,85             |
| ТМСЭ00/35          | 6300                  | 9,40                   | 46,5                    | 0,8              |

3. В таблице 2.3 приведены технические данные трехфазных трансформаторов серии ТСЗ (трансформатор трехфазный сухой с заземленным первичной обмоткой). Используя эти данные, определить: коэффициент трансформации  $k$ , номинальные значения токов первичной  $I_{1ном}$  и  $I_{2ном}$  вторичной обмоток; ток холостого хода  $I_{0ном}$  напряжение ко-

роткого замыкания  $U_{кн}$ ; сопротивление короткого замыкания  $Z_k$  и его активную  $r_k$  и индуктивную  $x_k$ , составляющие; определить номинальное изменение напряжения при значениях коэффициента мощности нагрузки  $\cos \varphi_2 = 1; 0,8(\text{инд.})$  и  $0,8(\text{емк.})$ ; номинальные и максимальные значения КПД трансформатора при коэффициентах мощности нагрузки  $\cos \varphi_2 = 1$  и  $0,8$ .

Таблица 2.3– Исходные данные к задаче 3

| Тип трансформатора | $S_{ном}$ , кВ<br>А | $U_{1ном}$ В | $U_{2ном}$ В | $P_{0ном}$ кВт | $P_{кном}$ кВт | $U_k$ | $I_0$ |
|--------------------|---------------------|--------------|--------------|----------------|----------------|-------|-------|
| 4.0                | 160                 | 6            | 0,23         | 0,7            | 2,7            | 5,5   |       |
| 4.0                | 160                 | 10           | 0,4          | 0,7            | 2,7            | 5,5   |       |
| 3,5                | 250                 | 6            | 0,23         | 1,0            | 3,5            | 5,5   |       |
| 3,5                | 250                 | 10           | 0,4          | 1,0            | 3,5            | 5,5   |       |
| 3,0                | 400                 | 6            | 0,23         | 1,5            | 5,4            | 5,5   |       |
| 3,0                | 400                 | 10           | 0,4          | 1,0            | 5,4            | 5,5   |       |
| 1,5                | G30                 | 6            | 0,4          | 2,0            | 7,5            | 5,5   |       |
| 1,5                | 630                 | 10           | 0,4          | 2,0            | 7,5            | 5,5   |       |
| 1,5                | 1000                | 6            | 0,4          | 3,0            | 11,3           | 5,5   |       |
| 1,5                | 1000                | 10           | 0,4          | 3,0            | 11,3           | 5,5   |       |
| 1,5                | 1600                | 10           | 0,4          | 4,2            | 16,0           | 5,5   |       |

4. Однофазный трансформатор имеет следующие номинальные данные:  $S_H = 10500$  кВА,  $U_{1H}/U_{2H} = 110/6,3$  кВ. Опытные данные короткого замыкания при номинальных токах в обмотках  $U_{1к} = 115$  кВ,  $P_{1к} = 81,5$  кВт, Опыт проводится при температуре обмоток  $75^\circ\text{C}$ . Вычислить активные и индуктивные сопротивления фаз обмоток трансформатора, полагая  $R_k = R'_2$  и  $X_k = X'_2$ . Какое напряжение необходимо подвести к обмотке НН при проведении опыта со стороны этой обмотки?

5. Изменение вторичного напряжения трансформатора при номинальной нагрузке и  $\cos \varphi_2 = 1$  составляет 1,97 %. Определить в абсолютных единицах электрические потери трансформатора, если  $S_H = 100$  кВА.

6. Определить изменение вторичного напряжения трансформатора в относительных единицах для нагрузки  $I_2 = 0,5I_{2H}$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$  по следующим данным:  $S_H = 100$  кВ·А,  $P_k = 1970$  Вт,  $u_k = 4,5$  %.

7. Трансформатор мощностью 63 кВ А имеет потери короткого замыкания 1280 Вт и напряжение короткого замыкания  $U_k = 4,5$  %. Найти значения угла нагрузки, при ко-

тором изменения вторичного напряжения не происходит.

8. Потери трансформатора, имеющего номинальную мощность  $S_H = 63 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ , при холостом ходе  $P_x = 265 \text{ Вт}$ , при коротком замыкании  $P_k = 1280 \text{ Вт}$ . Определить КПД трансформатора для номинальной нагрузки при трех значениях коэффициента мощности  $\cos\varphi_2 = 0,8; 1; (-0,8)$ .

9. Номинальная мощность трехфазного трансформатора  $S_H = 25 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ; напряжение первичной обмотки  $U_{1\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$ ; вторичной обмотки  $U_{2\text{ном}} = 400 \text{ В}$ ; потери при холостом ходе  $P_x = 125 \text{ Вт}$ ; сопротивление первичной обмотки  $R_1 = 48,4 \text{ Ом}$ ; вторичной обмотки  $R_2 = 0,077 \text{ Ом}$ . Определить КПД трансформатора для значений  $\beta = 0,5; 1; 1,25$  при коэффициенте мощности  $\cos\varphi_2 = 0,9$ .

10. Для однофазного трансформатора номинальной мощностью  $S_{\text{ном}} = 600 \text{ кВ}\cdot\text{А}$  и номинальным первичным напряжением  $U_{\text{ном}} = 31,5 \text{ кВ}$  мощностью короткого замыкания  $P_{\text{лх}} = 20 \text{ кВт}$  и напряжением короткого замыкания  $U_k = 8,5\%$ . Рассчитать данные и построить график зависимости изменения вторичного напряжения  $\Delta U$  от коэффициента нагрузки  $\beta$ , если коэффициент мощности нагрузки  $\cos\varphi_2$ .

### ***Практическая работа №3. Трёхфазные трансформаторы. Схемы и группы соединения трёхфазного трансформатора.***

**Тема.** Схемы и группы соединения трёхфазного трансформатора

**Цель занятия.** Изучить соединения трёхфазного трансформатора звездой и треугольником.

#### ***Основы теории:***

В отечественных трансформаторах приняты соединения обмоток: звезда, треугольник, зигзаг.

При соединении звездой  $Y$  концы обмоток образуют общую точку, а начала идут к сети. При соединении обмоток в треугольник  $\Delta$  начало первой фазной обмотки присоединяют к концу второй, начало второй к концу третьей, начало третьей к концу первой, а вершины образовавшегося треугольника к сети. При соединении зигзаг каждая фаза вторичной обмотки располагается на двух различных стержнях.

Вообще говоря, понятия начала и конца обмоток условны, они необходимы для правильного соединения фазных обмоток. В трёхфазном трансформаторе положительному направлению тока от начала к концу обмотки должно соответствовать определённое направление потока в стержнях.

Начала фазных обмоток ВН обозначают обычно большими буквами А, В, С, их концы соответственно Х, Y, Z, для обмоток НН эти обозначения соответственно а, b, с, и х, у, z. Если обмотка соединена звездой и у неё выведена нулевая точка, то применяют обозначение.

При включении трансформатора на параллельную работу большое значение имеет способ соединения обмоток, который определяется группой соединения. Номер группы соответствует углу между векторами линейных напряжений обмоток ВН и НН, отсчитанному по часовой стрелке от вектора линейного напряжения обмотки ВН. За единицу углового перемещения принят угол  $30^\circ$ . Существует 12 групп соединения – от 0-й до 11-й. (Раньше нулевая группа называлась 12).

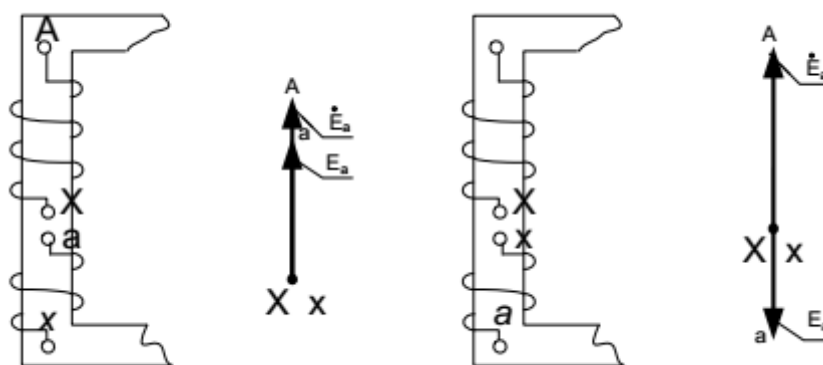


Рисунок 3.1– Группы соединений однофазного трансформатора

Методика определения групп трансформаторов.

Рассмотрим одну фазу трёхфазного трансформатора. Если обмотки низкого и высокого напряжения намотаны в одну сторону, то есть или по левой или по правой винтовой линии, верхние зажимы обмоток принять за их начала, а нижние за их концы, то ЭДС (векторы) индуцируемые в обмотках, во-первых, параллельны, т.к. индуцируются одним и тем же потоком, а во-вторых, направлены в одну сторону. Если зажимы обмотки НН перемаркировать, то  $E_A$  и  $E_a$  будут направлены параллельно, но встречно. При построении ВД, необходимой для определения группы, следует также учитывать, что, если на схеме концы обмоток соединены в одной точке, то и на векторной диаграмме соответствующие точки векторов фазных напряжений, обозначенных теми же буквами, также соединены вместе.

Обычно векторы линейных ЭДС обмоток уподобляют стрелкам часового циферблата, причём вектор ВН принимают за минутную стрелку, установленную на цифре 12, а вектор НН – за часовую стрелку, и цифра, на которую указывает часовая стрелка, определяет группу трансформатора. Пусть трёхфазный трансформатор имеет соединение обмоток ВН и НН в звезду. При этом:

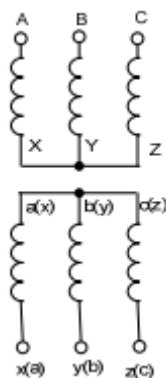


Рисунок 3.2 – Трёхфазный трансформатор со схемой соединения звезда

- 1) обмотки НН и ВН имеют одинаковую намотку;
  - 2) начала и концы обмоток расположены одинаково;
  - 3) одноимённые обмотки расположены на общих стержнях (например А и а, В и в).
- в).

Построим теперь ВД фазных и линейных ЭДС обмоток ВН и НН.

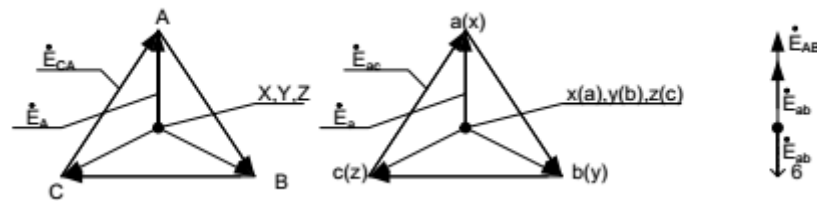


Рисунок 3.3 – Трёхфазный трансформатор с группой соединений Y/Y-0

При этом одноимённые векторы ЭДС совпадают по фазе, и если  $\vec{E}_{AB}$  совместимость на циферблате с цифрой 12, то «часовая стрелка»  $\vec{E}_{ab}$  покажет 12 или 0 «часов».

Если теперь в схеме Y/Y поменять местами начала и концы обмоток НН, то в ВД НН вектор поменяет направление на противоположное, и «часы» будут показывать 6-ю группу. При круговой перемаркировке фаз обмотки НН можно получить группы 4 и 8, поменяв местами начала и концы: 2 и 6, т.е. все чётные группы. Чётные группы получаются также при соединении  $\Delta / \Delta$ , а нечётные -  $\Delta / Y$  и  $Y / \Delta$ .

Рассмотрим теперь соединение Y/ $\Delta$ .

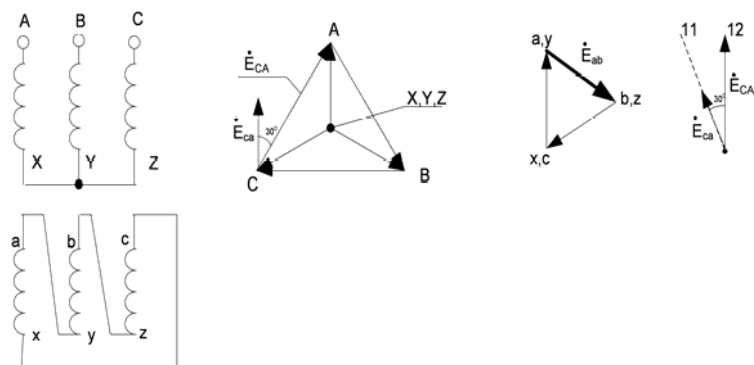


Рисунок 3.4 – Трёхфазный трансформатор со схемой и группой соединений Y/-11

Из рисунка видно, что вектор линейной ЭДС НН смещен на  $30^\circ$  по отношению к вектору ВН и расположится напротив цифры 11. Перемаркировкой зажимов можно получить группы 1,3,5,7 и 9. Чтобы обеспечить параллельную работу трансформаторов в РФ изготавливаются трансформаторы: Y/Y<sub>0</sub>-0;  $\Delta / Y_0$ -11,  $Y_0 / \Delta$ -11, Y / -11; слева от дроби – ВН; справа НН; «0» – вывод наружу нулевой точки. Y/Y<sub>0</sub>-0 – применяют на 10/0,4 и 6/0,4

кВ, при неравномерной нагрузке фаз: Y- 11; 35/10 кВ и 35/6 - Y / Δ-11, при  $U_{ЛН} > 110$  кВ – Y<sub>0</sub> / Δ-11.

С точки зрения влияния высших гармоник и поведения при несимметричной нагрузке целесообразно одну из обмоток соединить в треугольник, т. к. при этом исчезают во внешней цепи токи нулевой последовательности и гармоник, кратных трём.

#### Контрольные вопросы и задания

1. Какие схемы соединения обмоток трансформатора Вы знаете
2. Что такое группа соединения трансформатора?
3. Для Чего необходимо знать группу соединения трансформатора?
4. Как определяется группа соединения трансформатора?

#### Задачи

1. Определить группу трансформатора в соответствии с вариантом. Определить группу трансформатора в соответствии с вариантом.

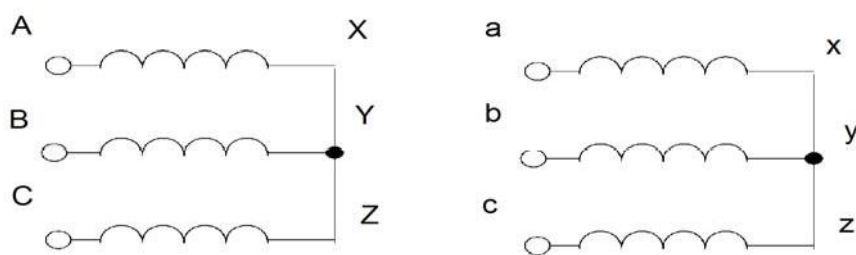


Рисунок 2.5 – Вариант 1

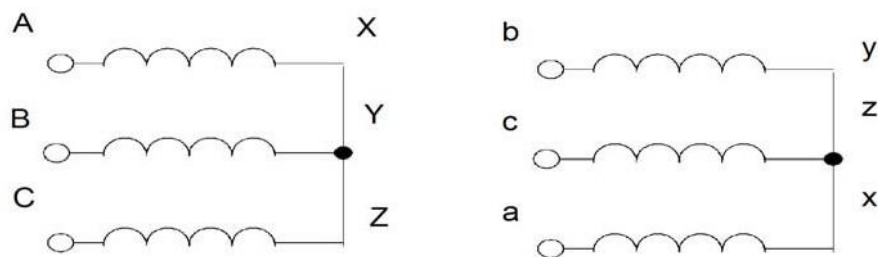


Рисунок 2.6 – Вариант 2



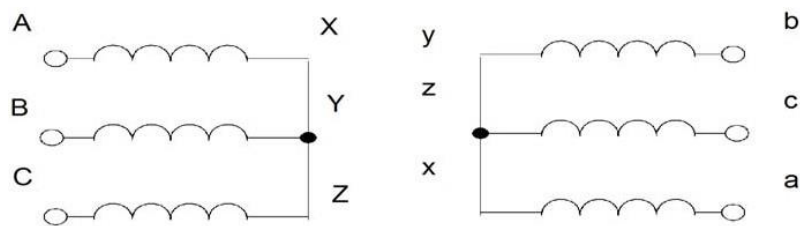


Рисунок 2.7– Вариант 3

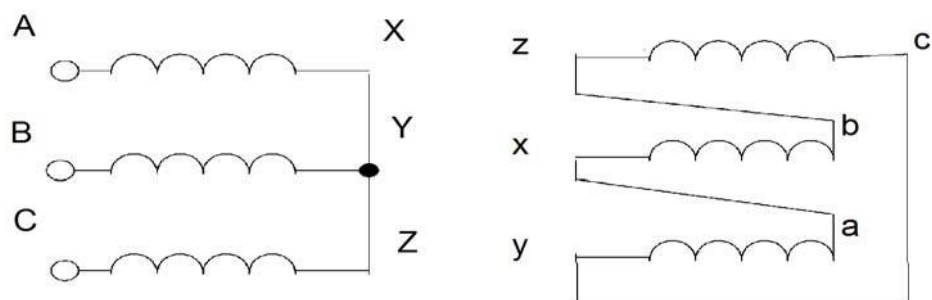


Рисунок 2.8 – Вариант 4

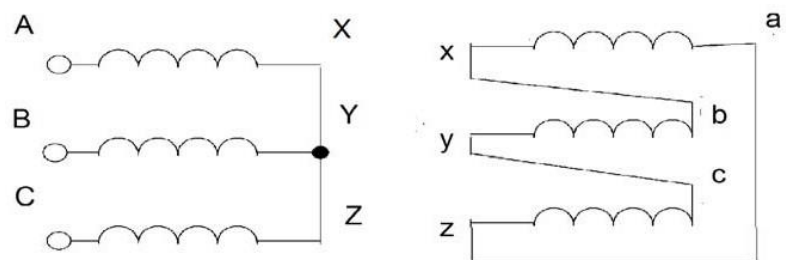


Рисунок 2.9 – Вариант 5

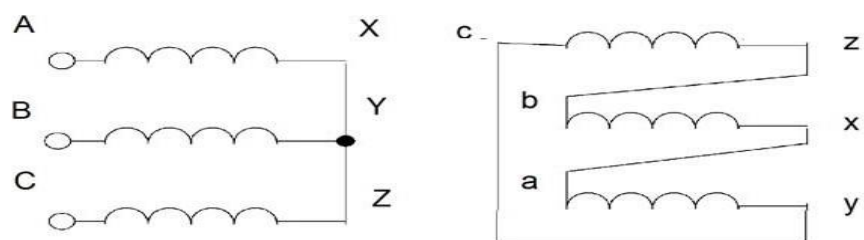


Рисунок 2.10 – Вариант 6

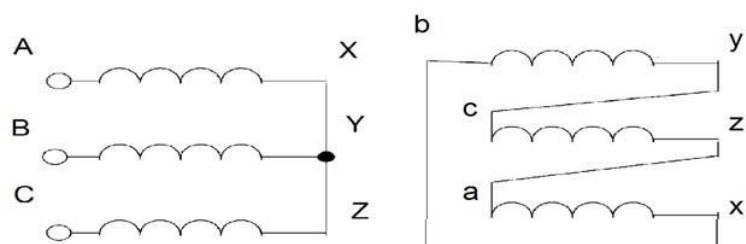


Рисунок 2.11 – Вариант 7

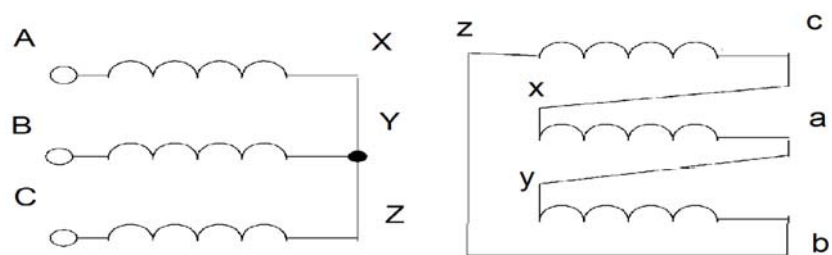


Рисунок 2.12 – Вариант 8

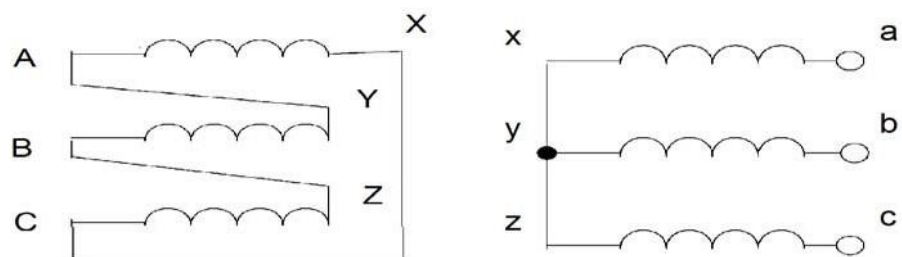


Рисунок 2.13 – Вариант 9

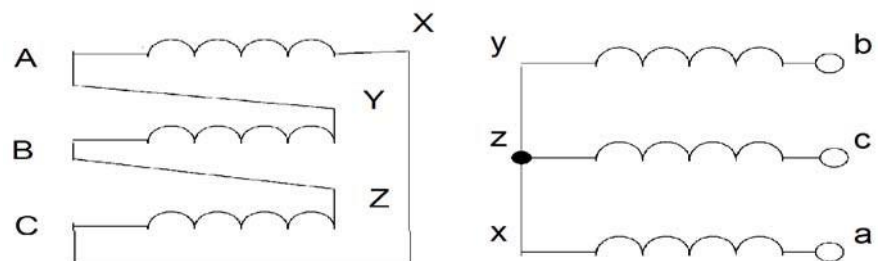


Рисунок 2.14 – Вариант 10

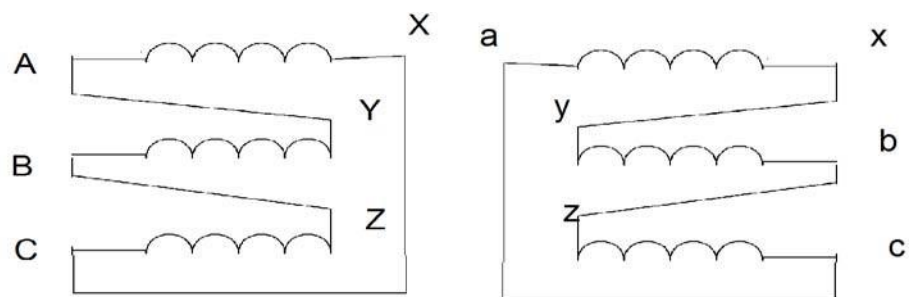


Рисунок 2.15 – Вариант 11

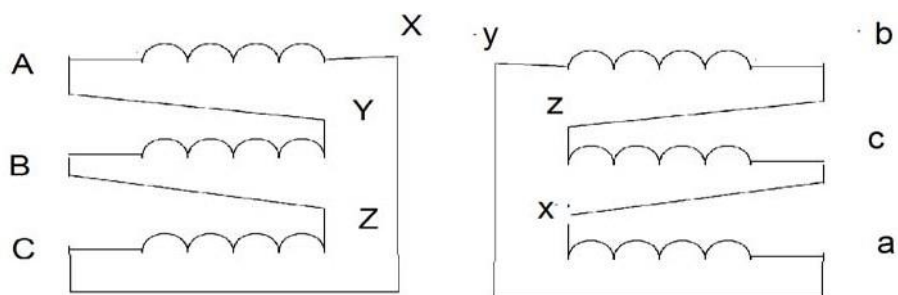


Рисунок 2.16 – Вариант 12

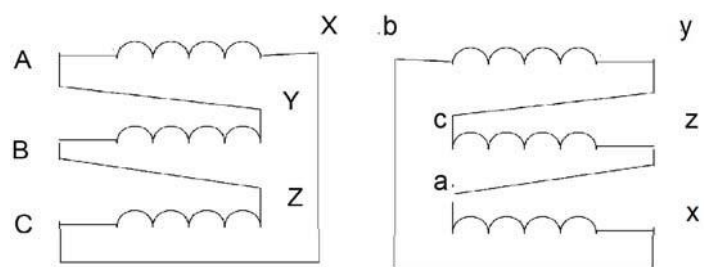


Рисунок 2.17 – Вариант 13

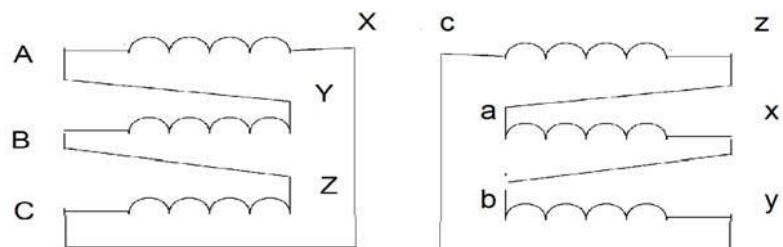


Рисунок 2.18 – Вариант 14

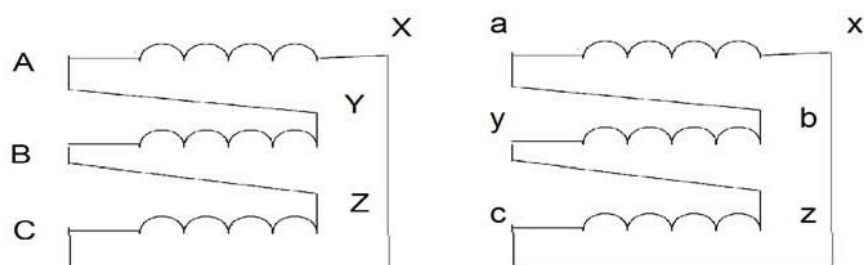


Рисунок 2.19 – Вариант 15

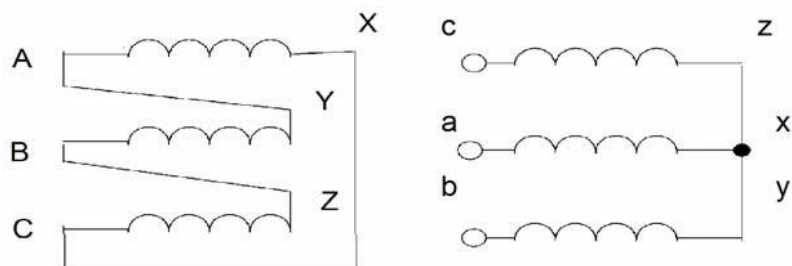


Рисунок 2.20 – Вариант 16

**Практическая работа №4. Режимы работы трехфазного трансформатора.  
Трансформация трехфазных токов.**

**Цель занятия.** Изучение трансформации токов в трёхфазной системе

**Основы теории:**

Трансформация трехфазных токов и напряжений осуществляется с помощью группы из трех однофазных трансформаторов или с помощью трехфазного двухобмоточного трансформатора со стержневым или броневым магнитопроводом.

Обмотки отдельных фаз соединяются в звезду – Y или треугольник –  $\Delta$ .

Напряжения и токи обмоток трехфазного трансформатора: при симметричных первичных линейных напряжениях:

$$\dot{U}_{AB} = U_{1л}; \dot{U}_{BC} = U_{1л} e^{-j(2\pi/3)}; \dot{U}_{CA} = U_{1л} e^{j(2\pi/3)} \quad (4.1)$$

и симметричных сопротивлениях нагрузки фазные токи и напряжения трансформатора получаются симметричными.

Фазные напряжения и токи трансформатора при соединении в звезду и зигзаг:

$$U_{\phi} = U_{л}/\sqrt{3}; I_{\phi} = I_{л} \quad (4.2)$$

при соединении в треугольник:

$$U_{\phi} = U_{л}; I_{\phi} = I_{л}/\sqrt{3} \quad (4.3)$$

**Контрольные вопросы и задания**

1. Как определить фазные напряжения и токи при соединении обмотки трансформатора по схеме «звезда»?
2. Как определить фазные напряжения и токи при соединении обмотки трансформатора по схеме «треугольник»?
3. Что собой представляет групповой трансформатор?

**Задачи**

1. Группа из трех однофазных трансформаторов одинаковой мощности с номинальными фазными напряжениями  $U_{1нф} = 500$  кВ и  $U_{2нф} = 20$  кВ используется для трансформации трехфазных токов. Первичные обмотки соединены в треугольник, вторичные – в звезду. Чему равны линейные напряжения на обмотках трансформатора? Найти коэффициент трансформации.
2. Напряжение трехфазной сети высокого напряжения  $U_{1с} = 525$  кВ, низкого –

$U_{2c} = 20$  кВ. При каком соединении обмоток трех однофазных трансформаторов с номинальными напряжениями  $U_{1н}/U_{2н} = 303/20$  кВ возможна трансформация трехфазных токов?

3. Обмотки трехфазного трансформатора соединены по схеме  $Y/\square$ , число витков каждой фазы первичной обмотки  $W_1 = 1000$ , вторичной обмотки  $W_2 = 200$ . Определить линейное напряжение на выходе трансформатора, если линейное напряжение питающей сети  $U_1 = 1000$  В.

**Практическая работа №5. Переходные процессы в трансформаторе. Экспериментальное определение параметров и потерь трансформатора.**

**Цель занятия:** Научиться рассчитывать параметры трансформатора и определять потери.

**Основы теории:**

В процессе опыта холостого хода трансформатора фиксируется  $U_{1(2)0}$ ,  $P_0$ ,  $I_{10}$ . По данным опыта рассчитывают сопротивления:

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_{10}} \quad (5.1)$$

$$r_0 = \frac{P_0}{3I_{10}^2} \quad (5.2)$$

$$x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} \quad (5.3)$$

Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_{10} I_{10}} \quad (5.4)$$

В опыте короткого замыкания трансформатора к первичной обмотке подводят меньшее (по сравнению с номинальным) напряжение так, чтобы ток  $I_{к1}$  был в пределах номинальных значений.

Так же, как и в предыдущем случае рассчитываются  $P_k$ ,  $Z_k$ ,  $r_k$ , и  $x_k$ .

Схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания имеет вид, показанный на рисунке 5.1.

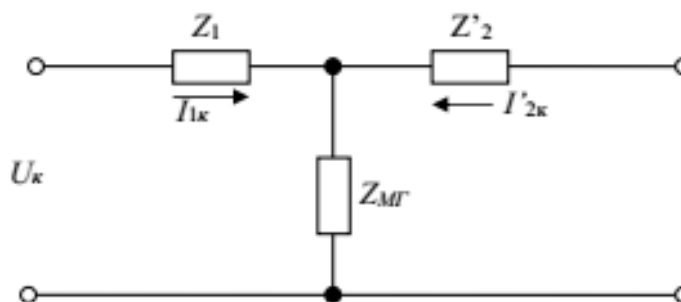


Рисунок 5.1 –Схема замещения трансформатора в режиме к.з.

Общее сопротивление схемы:

$$Z_k = Z_1 + \frac{Z_{MG} * Z'_2}{Z_{MG} + Z'_2} \quad (5.5)$$

так как  $Z_{\text{мг}} \gg Z'_2$ , то в знаменателе членом  $Z'_2$  можно пренебречь, тогда:

$$Z_{\text{к}} \approx Z_1 + Z'_2 \quad (5.6)$$

т.е. упрощенная схема замещения имеет вид:

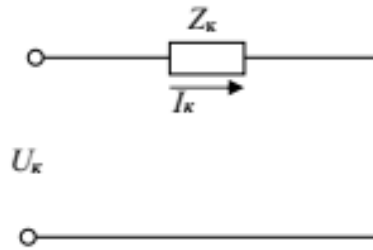


Рисунок 5.2 – Упрощенная схема замещения трансформатора в режиме к.з.

Напряжение  $U_{\text{к}}$ , при котором ток короткого замыкания равен номинальному  $I_{\text{к}} = I_{\text{н}}$ , называется напряжением короткого замыкания.

В относительных единицах:

$$U_{\text{к}}^* = \frac{I_{\text{н}} Z_{\text{к}}}{U_{\text{н}}} = Z_{\text{к}}^* \quad (5.7)$$

Величина  $U_{\text{к}}$  обычно выражается в паспортной табличке трансформатора.  $U_{\text{к}}$  можно определить из векторной диаграммы в режиме короткого замыкания:

Составляющим напряжения короткого замыкания:

$$U_{\text{ка}} = U_{\text{к}} * \cos \varphi_{\text{к}} \quad (5.8)$$

$$U_{\text{кт}} = U_{\text{к}} * \sin \varphi_{\text{к}} \quad (5.9)$$

*Пример 1.*

Номинальные данные трехфазного трансформатора при соединении обмоток по схеме «звезда-звезда»: мощность  $S_{\text{н}} = 63$  кВА, напряжение на обмотке высокого и низкого напряжения соответственно  $U_{\text{вн}} = 21$  кВ и  $U_{\text{нн}} = 0,4$  кВ. Потери холостого хода –  $P_0 = 0,29$  кВт, ток холостого –  $I_0 = 0,035 I_{\text{н}}$ , потери короткого замыкания –  $P_{\text{к}} = 1,65$  кВт, напряжение короткого замыкания –  $U_{\text{к}} = 4,5$  %, активная составляющая напряжения короткого замыкания –  $U_{\text{ка}} = 2,54$  %. Определить: коэффициент мощности при коротком замыкании и холостом ходе, сопротивления схемы замещения для режима короткого замыкания, КПД при номинальной нагрузке и коэффициентах мощности  $\cos \varphi_2 = 1$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$ ; активную мощность на вторичной стороне для  $\cos \varphi_2 = 0,8$ , при которой значение КПД будет наибольшим; потери в трансформаторе при мощности  $S = 10$  кВ·А; напряжение на выводах вторичной обмотки при номинальной нагрузке и коэффициентах мощности  $\cos \varphi_1 = 1$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$ .

**Решение:**

Номинальные токи, А:

$$I_{1н} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{вн}} = \frac{63 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 21 \cdot 10^3} = 1.73$$

$$I_{2н} = \frac{U_{вн}}{U_{нн}} \cdot I_{1н} = \frac{63 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 21 \cdot 10^3} = 91$$

Коэффициенты мощности, о.е.:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{вн}I_0} = \frac{0.29}{\sqrt{3} \cdot 21 \cdot (0.035 \cdot 1.73)} = 0.132$$

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3}U_k I_{1н}} = \frac{1.65}{\sqrt{3} \cdot 21 \cdot (0.045 \cdot 1.73)} = 0.592$$

Сопротивления короткого замыкания, Ом:

$$r_k = r_1 + r_2' = \frac{P_k}{mI_{1н}^2} = \frac{1650}{3(1.73)^2} = 183$$

$$x_k = x_1 + x_2' = \frac{U_{кр}[\%] \cdot (U_{1н}/\sqrt{3})}{100I_{1н}} = \frac{\sqrt{U_k^2 - U_{ка}^2} \cdot U_{1н}}{100\sqrt{3}I_{1н}} = \frac{\sqrt{(4.5)^2 - (2.54)^2} \cdot 21000}{100\sqrt{3} \cdot 1.73} = 260$$

Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке, о.е.:

$$\eta_n = \frac{P_{2н}}{P_{1н}} = \frac{S_n \cos \varphi_2}{S_n \cos \varphi_2 + P_0 + P_k}$$

$$\text{при } \cos \varphi_2 = 1$$

$$\eta_n = \frac{63 \cdot 1}{63 \cdot 1 + 0.29 + 1.65} = 0.97$$

$$\text{при } \cos \varphi_2 = 0.8$$

$$\eta_n = \frac{63 \cdot 0.8}{63 \cdot 0.8 + 0.29 + 1.65} = 0.963$$

Максимальное значение коэффициента полезного действия соответствует условию  $P_0 = P_k$ . Учитывая, что потери короткого замыкания  $P_k = 3I_{1\varphi}^2 r_k$ , определяются значения тока

$$I_1 = \sqrt{\frac{P_k}{3r_k}} = \sqrt{\frac{P_0}{3r_k}} = \sqrt{\frac{290}{3 \cdot 183}} = 0.727 \text{ А}$$

и активной мощности на вторичной стороне

$$P_2 = \sqrt{3}U_{2н}I_2 \cos \varphi_2 = \sqrt{3}U_{2н} \left( \frac{U_{1н}}{U_{2н}} \right) I_1 \cos \varphi_2 = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot \left( \frac{21000}{400} \right) 0.927 \cdot 0.8 = 16.9 \text{ кВт}$$

Потери мощности в трансформаторе при  $S = 10 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ :

$$\Sigma \Delta P = P_0 + k_n^2 P_k = P_0 + \left( \frac{S}{S_n} \right)^2 P_k = 0.29 + \left( \frac{10}{60} \right)^2 1.65 = 0.336 \text{ кВт}$$

Напряжение на вторичной обмотке, соответствующее упрощенной схеме замещения трансформатора под нагрузкой:



$$U_2' = U_1 - I_1(r_k \cos \varphi_2 + x_k \sin \varphi_2)$$

$$\cos \varphi_2 = 1$$

$$U_2' = \frac{21000}{\sqrt{3}} - 1.73 * 183 * 1 = 11820 \text{ В.}$$

$$\cos \varphi_2 = 0,8$$

$$U_2' = \frac{21000}{\sqrt{3}} - 1.73 * (183 * 1 + 260 * 0.599) = 11630 \text{ В}$$

Напряжение на выводах вторичной обмотки при номинальной нагрузке:

$$U_{2\text{нн}} = \frac{\sqrt{3}U_2'}{k} = \frac{\sqrt{3}U_2'}{(U_{\text{вн}}/U_{\text{нн}})}$$

$$\cos \varphi_2 = 1$$

$$U_{2\text{нн}} = \frac{\sqrt{3} * 11820}{(21/0.4)} = 390 \text{ В.}$$

$$\cos \varphi_2 = 0.8$$

$$U_{2\text{нн}} = \frac{\sqrt{3} * 11630}{(21/0.4)} = 383 \text{ В.}$$

### Контрольные вопросы и задания

1. Какие опыты проводятся для определения параметров схемы замещения трансформатора?
2. Каковы условия проведения опыта короткого замыкания трансформатора?
3. Чему равно напряжение короткого замыкания в относительных единицах?
4. Что определяет мощность, измеренная в опыте короткого замыкания?

### Задачи

2. Номинальная мощность трехфазного трансформатора  $S_{\text{н}} = 25 \text{ кВ А}$ ; номинальные напряжения  $U_{1\text{н}} = 10 \text{ кВ}$ ; вторичной обмотки  $U_{2\text{н}} = 0,4 \text{ В}$ . Схема соединения Y/Y. Трансформатор испытан в режиме холостого хода со стороны обмотки НН. При номинальном напряжении ток  $I_{2\text{х}} = 1,15 \text{ А}$ , потребляемая мощность  $P_{2\text{х}} = 0,135 \text{ кВт}$ . Найти ток холостого хода трансформатора в относительных единицах и коэффициент мощности в режиме холостого хода.

3. Частота питающей сети в опыте холостого хода трансформатора  $f = 49 \text{ Гц}$ . Какое напряжение необходимо подвести к первичной обмотке трансформатора с номинальным напряжением  $U_{1\text{н}} = 400 \text{ В}$  и частотой  $50 \text{ Гц}$ , чтобы реактивная составляющая тока холостого хода осталась без изменений?

4. Однофазный трансформатор имеет следующие номинальные данные:  $S_{\text{н}} = 10500 \text{ кВ·А}$ ,  $U_{1\text{н}}/U_{2\text{н}} = 110/6,3 \text{ кВ}$ . Опытные данные короткого замыкания при номинальных токах в обмотках  $U_{1\text{к}} = 11,5 \text{ кВ}$ ,  $P_{1\text{к}} = 81,5 \text{ кВт}$ . Опыт проводился при температуре обмоток

75°С. Вычислить активные и индуктивные сопротивления фаз обмоток трансформатора, полагая  $R_1 = R'_2$  и  $X_1 = X'_2$ . Какое напряжение необходимо подвести к обмотке НН при проведении опыта со стороны этой обмотки?

**Практическая работа №6. Магнитная цепь машины постоянного тока. Магнитное поле взаимной индукции многофазной обмотки машины постоянного тока. Способы подавления высших гармоник ЭДС машины постоянного тока.**

**Цель занятия.** Расчёт магнитного поля взаимной индукции многофазной обмотки машины переменного тока. Изучение способов подавления высших гармоник ЭДС машины переменного тока.

**Основы теории:**

Разложение магнитодвижущей силы (МДС) периодической системы катушек в ряд Фурье.

Пространственное распределение МДС в момент времени  $t = 0$

$$F = \sum_{v=1}^{\infty} F_{vm} \cos v\alpha \quad (6.1)$$

Амплитуда  $\square$ -ой гармонической МДС периодической системы катушек

$$F_{kvm} = \frac{4}{\pi v} F_{km} k_{yv} = \frac{4}{\pi v} \sqrt{2} I_a w_k k_{yv} \quad (6.2)$$

где  $\square \square 1 \square 2c$ ,  $c = 0, 2, 3 \dots$

Коэффициент укорочения шага обмотки, характеризующий влияние шага катушки  $y_k$  на амплитуду гармоник МДС,

$$k_{nv} = \sin \frac{vy_k \pi}{2\tau} \quad (6.3)$$

При выборе шага катушки

$$y_k = (v - 1) \tau / v \quad (6.4)$$

гармонических  $\square$ -го порядка в МДС содержаться не будет.

Магнитодвижущая сила фазы.

Амплитуда  $\square$ -й гармонической МДС фазы через амплитудный ток катушечной стороны

$$F_{\phi v} = q F_{kvm} k_{pv} = 4q k_{yv} k_{pv} \sqrt{2} I_a w_k / (\pi v) \quad (6.5)$$

Амплитуда  $\square$ -й гармонической МДС фазы через действующий ток фазы  $I = a I_a$

$$F_{\phi vm} = 2\sqrt{2} I w k_{pv} k_{yv} / (\pi p v) \quad (6.6)$$

Где  $w \square 2 p w_k q / a$  – число витков в параллельной ветви фазы.

Коэффициент распределения обмотки:

$$k_{pv} = \frac{\sin[v\pi/(2m)]}{q \sin[v\pi/(2mq)]} \quad (6.7)$$

Обмоточный коэффициент для основной гармонической МДС

$$k_{o6} = k_{y1} k_{p1} \quad (6.8)$$

Порядок зубцовых высших гармонических

$$kZ/p \approx 1 \approx 2mqk \approx 1, \quad (6.9)$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots$

Магнитодвижущая сила трехфазной обмотки

$$F(a, t) = \sum_{v=1}^{\infty} F_{vm} \cos(\pm \omega t - v\alpha) \quad (6.10)$$

где

$$F_{vm} = (3/2)F_{\Phi vm} = 3\sqrt{2}I * w * k_{pv} * k_{yv}/(\pi v p) \quad (6.11)$$

или

$$F_{vm} = 6qk_{pv}k_{yv}\sqrt{2}I_a w_k/(\pi v) \quad (6.12)$$

Где  $q = 6c \approx 1, c = 0, 1, 2, 3, \dots$

Прямая гармоническая МДС трехфазной обмотки вращается с угловой скоростью

$$\Omega = w/p \quad (6.13)$$

в положительном направлении,

$v$ -я гармоническая МДС вращается с угловой скоростью

$$\Omega_v = \pm \Omega_1 * v$$

Обмотка статора бесколлекторной машины постоянного тока располагается в пазах на внутренней поверхности сердечника статора. Она выполняется из медного изолированного провода круглого или прямоугольного сечения.

Элементом обмотки статора является одно- или многовитковая катушка. Элементы катушки, располагаемые в пазах, называются пазовыми сторонами, а части, находящиеся вне пазов и служащие для соединения пазовых сторон, – лобовыми частями.

Обмотки статора характеризуются параметрами:

числом фазных обмоток,  $m_1$  – однофазные ( $m_1 = 1$ ) и многофазные, обычно трехфазные ( $m_1 = 3$ );

шагом обмотки по пазам  $y_1$  – с полным (диаметральным) шагом ( $y_1 = \tau$ ) и укороченным шагом ( $y_1 < \tau$ ).

Здесь  $\tau$  – полюсное деление, м,

$$\tau = \pi D_1 / (2p) \quad (6.15)$$

где  $D_1$  – внутренний диаметр статора, м;

$2p$  – число полюсов обмотки статора.

Полный шаг обмотки

$$y_1 = Z_1 / (2p) = \tau \quad (6.16)$$

В этом случае ЭДС, индуцируемая в каждом витке катушки статора вращающимся магнитным полем, определяется арифметической суммой ЭДС сторон этого витка, то есть

$$e_{\text{вит}} = e_1 + e_2 \quad (6.17)$$

Если шаг обмотки укороченный ( $y_1 < \tau$ ), то ЭДС витка определяется геометрической суммой ЭДС его пазовых сторон, т.е. учитывается фазовый сдвиг этих ЭДС, при этом ЭДС витка, а следовательно, и ЭДС всей фазной обмотки  $E_y$ , уменьшается. Это уменьшение ЭДС, вызванное укорочением шага обмотки, учитывается коэффициентом укорочения  $k_y = E_y / E_d$ . Коэффициент укорочения первой (основной) гармоники:

$$k_{y1} = \sin\left(\beta * \frac{\pi}{2}\right) \quad (6.18)$$

– где  $\beta = \frac{y_1}{\tau}$  относительный шаг обмотки.

Для ЭДС любой гармоники ( $v$  – номер гармоники)

$$k_{yv} = \sin\left(v\beta * \frac{\pi}{2}\right) \quad (6.19)$$

Порядок зубцовых высших гармоник

$$v = k * Z / p \pm 1 = 2m * q * k \pm 1 \quad (6.20)$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots$

Так как высшие гармоники ЭДС могут вызвать в электрических сетях и приемниках ряд нежелательных явлений, необходимо принимать меры для подавления этих гармоник.

Таблица 6.1 – Значения коэффициента  $k_{yv}$  в зависимости от относительного шага  $\beta$

| Относительный шаг обмотки $\beta$ | 4/5   | 6/7   | 1 |
|-----------------------------------|-------|-------|---|
| Коэффициент укорочения $k_{yv}$   |       |       |   |
| 1-я гармоника                     | 0,951 | 0,975 | 1 |
| 5-я гармоника                     | 0     | 0,433 | 1 |
| 7-я гармоника                     | 0,573 | 0     |   |

Таблица 6.2 - Коэффициенты распределения для 1, 5, 7-й гармоник

| Число пазов<br>на полюс и фазу $q_1$ ..... |      | 1     | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | $\infty$ |
|--------------------------------------------|------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| Коэффициент<br>распределения $k_p$ :       |      |       |        |        |        |        |        |          |
| 1-я гармоника                              | .... | 1,000 | 0,966  | 0,960  | 0,958  | 0,957  | 0,956  | 0,955    |
| 3-я                                        | »    | ....  | 1,000  | 0,707  | 0,667  | 0,654  | 0,646  | 0,636    |
| 5-я                                        | »    | ....  | 1,000  | 0,259  | 0,217  | 0,204  | 0,200  | 0,197    |
| 7-я                                        | »    |       | -1,000 | -0,259 | -0,178 | -0,157 | -0,149 | -0,145   |

Подавление высших гармоник ЭДС можно осуществить с помощью соответствующей конструкции обмоток. К конструктивным мерам относятся:

- 1) укорочение шага обмотки;
- 2) распределение обмотки по пазам таким образом, чтобы число катушек в катушечной группе было  $q > 1$ .

По своей конструкции обмотки статора разделяются на сосредоточенные и распределенные. В сосредоточенных обмотках статора обмотка каждой фазы располагается в двух пазах, а в распределенной обмотке – катушки каждой фазы занимают несколько пазов. Распределение катушек в пазах сердечника статора вызывает некоторое уменьшение ЭДС катушечной группы распределенной обмотки  $E_{\text{дп}}$  по сравнению с ЭДС катушечной группы сосредоточенной обмотки  $E_{\text{дс}}$ .

Для количественной оценки этого уменьшения ЭДС используется коэффициент распределения обмотки, представляющий собой отношение ЭДС распределенной обмотки к ЭДС сосредоточенной обмотки:

$$k_{y1} = \sin\left(\beta * \frac{\pi}{2}\right) \quad (6.21)$$

Коэффициент распределения обмотки для первой гармоники ЭДС

$$k_{p1} = \frac{\sin(0.5 * q_1 * \gamma)}{q_1 \sin(0.5\gamma)} \quad (6.22)$$

где  $\gamma$  – угол сдвига по фазе между векторами пазовых ЭДС, т.е. ЭДС, наводимых в проводниках, лежащих в соседних пазах статора, эл. град.:

где  $Z_1$  – число пазов обмотки.

$$\gamma = 360p/Z_1 \quad (6.23)$$

Так как угол сдвига по фазе между векторами пазовых ЭДС для  $v$ -й гармоники в  $v$  раз больше пазового угла  $\gamma$ , то коэффициент распределения обмотки для любой гармоники ЭДС равен

$$k_{pv} = \frac{\sin(0.5 * v * q_1 * \gamma)}{q_1 * \sin(0.5 * v * \gamma)} \quad (6.24)$$

ЭДС фазной обмотки статора определяется выражением

$$E_{\phi 1} = 4.44 \Phi * f_1 * w_1 * k_{o\phi 1} \quad (6.25)$$

где  $\Phi$  – основной магнитный поток,

$$\Phi = (2/\pi) B_{\delta} * l_1 * \tau \quad (6.26)$$

$B_{\delta}$  – магнитная индукция в воздушном зазоре между статором и ротором,

$f_1$  – частота переменного тока в обмотке статора, Гц;

$w_1$  – число последовательно соединенных витков в фазной обмотке статора

$$w_1 = 2pq_1 * w_k = Z_1 * w_k / m_1 \quad (6.27)$$

$w_k$  – число витков в катушке обмотки статора;

$k_{o\phi 1}$  – обмоточный коэффициент, учитывающий уменьшения ЭДС, вызванные укорочением шага катушки и распределенной конструкцией обмотки

$$k_{o\phi 1} = k_{y1} k_{p1}$$

При выборе шага катушки

$$y_1 = \frac{(v - 1)}{v} \quad (6.28)$$

гармонических  $v$ -го порядка в ЭДС содержаться не будет.

*Пример 1.*

Статор трехфазной бесколлекторной машины переменного тока с внутренним диаметром  $D_1 = 0,2$  м; длиной  $l_1 = 0,2$  м; имеет число пазов  $Z_1 = 36$ , число полюсов  $2p = 4$ . Определить ЭДС одной фазы обмотки статора, если шаг обмотки по пазам  $y_1 = \tau$ , число витков в катушке  $w_k = 4$ , магнитная индукция в воздушном зазоре машины  $B_{\delta} = 0,75$  Тл, а частота тока питающей сети  $f_1 = 50$  Гц.

*Решение:*

Полюсное деление

$$\tau = \pi * D_1 / (2p) = 3.14 * 0.2 / 4 = 0.157 \text{ м}$$

Основной магнитный поток

$$\Phi = (2/\pi) B_{\delta} * l_1 * \tau = 0,64 * 0,75 * 0,2 * 0,157 = 0,015 \text{ Вб}$$

Число последовательно соединенных витков в фазной обмотке статора

$$w_1 = Z_1 * w_k / m_1 = 36 * 4 / 3 = 48 \text{ витков}$$

Число пазов на полюс и фазу

$$q_1 = Z_1 / (2p m_1) = 36 / (4 * 3) = 3 \text{ паза}$$

Коэффициент распределения и обмоточный коэффициент для первой (основной) гармоники:

$$k_{p1} = 0,96$$

$$k_{o\phi 1} = k_{p1} = 0.96.$$

ЭДС фазной обмотки

$$E_{\phi} = 4,44 * \Phi * f_1 * w_1 * k_{o\phi 1} = 4,44 * 0,015 * 50 * 48 * 0,96 = 153 \text{ В.}$$

Пример 2.

Используя данные примера 1 и результаты его расчета, определить ЭДС фазной обмотки статора первой (основной) гармоники; обмотку выполнить с укороченным шагом. Рассчитать линейную ЭДС основной гармоники при соединениях обмотки статора «звездой» и «треугольником». На сколько будут ослаблены ЭДС пятой и седьмой гармоник при принятом укорочении шага обмотки на один паз.

Решение:

Полный (диаметральный) шаг

$$y_1 = Z_1 / 2p = 36 / 4 = 9 \text{ пазов}$$

Укороченный шаг

$$y_k = 9 - 1 = 8 \text{ пазов.}$$

Относительный шаг

$$\beta = y_k / y_1 = 8 / 9 = 0.89$$

Угол сдвига фаз между векторами пазовых ЭДС:

— для первой (основной) гармоники ( $\nu = 1$ )

$$k_{y1} = \sin\left(\beta * \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(0.89 * \frac{\pi}{2}\right) = 0.985$$

— для пятой гармоники ( $\nu = 5$ )

$$k_{y5} = \sin\left(5 * 0.89 * \frac{\pi}{2}\right)$$

— для седьмой гармоники ( $\nu = 7$ )

$$k_{y7} = \sin\left(7 * 0.89 * \frac{\pi}{2}\right) = -0.353$$

Коэффициенты распределения для 1, 5, 7-й гармоник при  $q_1 = 3$  (смотри таблицу 6.2)

$$k_{p1} = 0.96$$

$$k_{p5} = 0.217$$

$$k_{p7} = -0.178$$

Обмоточные коэффициенты

$$k_{o\phi 1} = 0.985 * 0.96 = 0.946$$

$$k_{o\phi 5} = 0.985 * 0.217 = 0.214$$

$$k_{o\phi 7} = -0.353 * (-0.178) = 0.062$$

ЭДС фазы основной гармоники

$$E_{\phi 1y} = 4,44 * \Phi * f_1 * w_1 * k_{o\phi 1} = 4.44 * 0.015 * 50 * 48 * 0.946 = 151 \text{ В}$$



Таким образом, укорочение шага обмотки на один паз привело к уменьшению ЭДС основной гармоники на:

$$\frac{(E_{\phi 1} - E_{\phi 1y}) * 100}{E_{\phi 1}} = \frac{(153 - 151) * 100}{153} \approx 1.3\%$$

При этом ЭДС 5-й гармоники уменьшится на 35 %, в седьмой гармоники – на 65 %.

Линейная ЭДС при соединении обмоток «треугольником» останется равной фазной ЭДС  $E_{\phi 1y} = 151\text{В}$ , а при соединении «звездой», она будет равна.

$$E_L \approx \sqrt{3} \approx 151 \approx 261\text{В}.$$

### Контрольные вопросы и задания

1. Что характеризует влияние шага катушки обмотки на амплитуду гармоник МДС?
2. Объясните смысл коэффициента распределения обмотки.
3. Как определить обмоточный коэффициент обмотки?
4. С какой скоростью вращается основная гармоническая МДС трехфазной обмотки?
5. Как определить полную МДС трехфазной обмотки при симметричной нагрузке?
6. Какие параметры характеризуют обмотки статора машины переменного тока?
7. Как определить ЭДС витка при укорочении шага обмотки?
8. Как с помощью конструкции обмотки осуществить подавление высших гармоник ЭДС?
9. Как влияет распределение обмотки на величину ЭДС катушечной группы?
10. Как выбрать шаг обмотки, при котором не будет в ЭДС содержаться гармонических составляющих  $n$ -го порядка?
11. Чем определяется необходимость подавления высших гармоник ЭДС обмотки машины переменного тока?

### Задачи

1. Определить коэффициент укорочения шага обмотки для первой основной гармонической МДС, если в зубцовых делениях полюсное деление обмотки равно 15, а ее шаг  $y = 11$ .
2. Общее число катушек восьмиполусной двухслойной обмотки равно 72. Шаг обмотки в зубцовых делениях равен 7. Определить коэффициент укорочения шага обмотки.

ки для первой, третьей и пятой гармонических МДС.

3. Число зубцов магнитопровода равно 90. Определить шаг шестиполусной двухслойной обмотки в зубцовых делениях, при котором пятая гармоническая в МДС сохраняться не будет. Чему равен при таком шаге коэффициент укорочения для первой гармонической?

4. Определить коэффициент распределения трехфазной обмотки основной гармонической МДС фазы, если фаза состоит из двух периодических систем катушек ( $q = 2$ ). Чему равен  $k_p$  при удвоении числа  $q$ ?

5. Трехфазная шестиполусная обмотка с числом витков в фазе  $w = 68$  и обмоточным коэффициентом  $k_{об} = 0,866$  питается симметричной системой токов прямой последовательности с током в фазе А  $i_A = 250 \cos 314t$  А. Определить амплитуду и частоту вращения первой гармонической МДС обмотки.

6. Определить амплитуду основной, пятой и седьмой гармонических МДС трехфазной двухслойной обмотки с числом пазов на полюс и фазу  $q = 3$ , шагом обмотки  $y_k = 0,8\tau$ , числом витков в катушке  $w_k = 21$ . Ток параллельной ветви  $I_a = 15$  А.

7. Четырехполусная трехфазная двухслойная обмотка содержит 60 катушек. Шаг обмотки  $y = 11$  зубцовых делений. Число витков в фазе  $w = 50$ . Ток в фазе  $I = 442$  А. Определить амплитуды, угловые скорости и направления вращения основной, пятой и первой зубцовых гармонических МДС обмотки. Частота тока  $f = 50$  Гц.

8. Общее число катушек восьмиполусной двухслойной обмотки равно 72. Шаг обмотки в зубцовых делениях  $y_1 = 7$ . Определить коэффициент укорочения шага обмотки для первой, третьей и пятой гармонических ЭДС.

9. Число зубцов магнитопровода  $Z = 90$ . Определить шаг шестиполусной двухслойной обмотки в зубцовых делениях, при котором пятая гармоническая в ЭДС сохраняться не будет. Чему равен при таком шаге коэффициент укорочения для первой гармонической?

10. Вычислить обмоточный коэффициент для основной, пятой и седьмой гармонических трехфазных двухслойных обмоток, если магнитопровод имеет  $Z = 72$  зубца, шаг обмотки в зубцовых делениях  $y = 7$ . Обмотка многополусная  $2p = 8$

## ***Практическая работа №7. Обмотки якоря машин постоянного тока. Расчет и построение якорной обмотки машины постоянного тока.***

**Цель занятия:** Научиться рассчитывать построение якорной обмотки машины постоянного тока

### ***Основы теории:***

Обмотка якоря является важнейшим элементом машины и должна удовлетворять следующим требованиям:

- 1) обмотка должна быть рассчитана на заданные величины напряжения и тока нагрузки, соответствующие номинальные мощности;
- 2) обмотка должна иметь необходимую электрическую, механическую и термическую прочность, обеспечивающую достаточно продолжительный срок службы машин (до 15-20 лет);
- 3) конструкция обмотки должна обеспечить удовлетворительные условия токо-съема с коллектора, без вредного искрения;
- 4) расход материала при заданных эксплуатационных показателях (к.п.д. и др.) должен быть минимальным;
- 5) технология изготовления обмотки должна быть по возможности простой.

По схеме соединения проводников обмотки якоря машин постоянного тока разделяются на простые петлевые, простые волновые, сложные петлевые, сложные волновые и лягушачьи. Свое название петлевые и волновые обмотки получили по форме, которую они образуют при последовательном соединении секций; первые имеют форму петель, вторые – форму волн.

По числу слоев в пазу обмотки машин постоянного тока выполняются, как правило, двухслойными, лягушачьи – четырехслойными.

При составлении схемы обмотки необходимо определить ее шаги как по пазам, так и по коллектору.

Число элементарных пазов

$$Z_{\varepsilon} = Z \cdot u_n, \quad (18.1)$$

где  $u_n$  – число секционных сторон в одном слое паза;

$Z$  – действительное число пазов.

Полное число элементарных пазов

$$Z_{\varepsilon} = S = K. \quad (18.2)$$

Для построения схемы обмотки необходимо определить следующие шаги:

$y_1$  – первый частичный шаг, равный числу элементарных пазов по ширине секции;  
 $y_2$  – второй частичный шаг, равный числу элементарных пазов между конечной стороной при обходе секции и начальной стороной последующей секции;

$y$  – результирующий шаг, равный сдвигу секций, следующих одна за другой по схеме обмотки; этот шаг также измеряется числом элементарных пазов;

$y_k$  – шаг по коллектору, равный числу коллекторных делений между началом и концом секции.

Шаг  $y_1$  обмоток постоянного тока принимается близким полюсному делению  $\tau = Z_p/2p$ , то есть

$$y = \frac{Z_p}{2p} \pm \varepsilon \quad (18.4)$$

где  $\varepsilon$  – укорочение или удлинение шага обмотки.

Величина является дробной частью отношения  $Z_p/2p$ , которая при знаке минус уменьшает его, а при знаке плюс дополняет до ближайшего целого числа

Шаг по пазам равен:

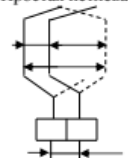
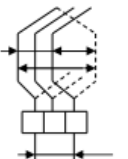
$$y_z = y_1 / u_n \quad (18.5)$$

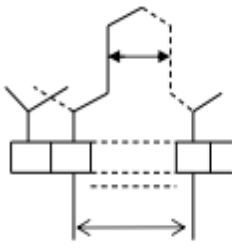
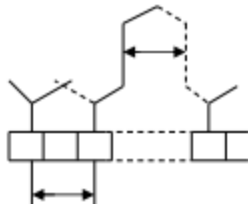
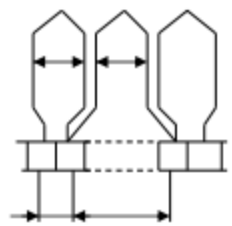
Если  $y_z$  – целое число, то обмотка является равносекционной, если  $y_z$  – дробное – ступенчатой.

В процессе расчета обмотки необходимо определить: число параллельных ветвей обмотки  $2a$  и шаги  $y_1$ ,  $y$ ,  $y_k$ , а также максимально возможное число уравнильных соединений.

Расчетные выражения в зависимости от схемы обмотки следует принять по таблице 18.1.

Таблица 18.1 – Основные данные обмоток якоря

| Тип обмотки                                                                                                          | Число параллельных ветвей | Шаги обмотки      |                                      | Максимальное число уравнильных соединений |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|
|                                                                                                                      |                           | $y$               | $y_1$                                |                                           |
| Простая петлевая<br>              | $2a = 2p$                 | $y = y_k = \pm 1$ | $y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon$ | $K / p$                                   |
| Сложная петлевая двух-ходовая<br> | $2a = 4p$                 | $y = y_k = \pm 2$ | $y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon$ | $K / p$                                   |

|                                                                                                                            |                    |                                 |                                                        |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------|---|
| <p>Простая волновая</p>                   | $2a = 2$           | $y = y_k = \frac{K \pm 1}{p}$   | $y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon$                   |   |
| <p>Сложная волновая<br/>многоходовая</p>  | $2a = 2m$          | $y = y_k = \frac{K \pm m}{p}$   | $y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon$                   | m |
| <p>Лягушачья</p>                         | $2a = 2p \cdot 2m$ | $y_{kn} + y_{ks} = \frac{K}{p}$ | $y_{1n} + y_{1s} = \frac{K}{p}$<br>$y_{2n} \pm y_{2s}$ | — |

Порядок выполнения таблицы соединения секционных сторон обмотки:

Таблица представляет собой условное упрощенное изображение последовательно соединенных секций обмотки (рисунок 28.1), причем сплошной линией показывают секционную сторону, уложенную в верхний слой элементарного паза, штриховой – в нижний слой паза.

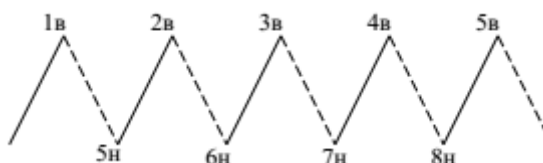


Рисунок 18.1 – Таблица соединения секционных сторон обмотки

Номера верхних сторон секций проставляются в таблице сверху, нижних – снизу, причем нумерация соответствует шагам обмотки.

Например, для обмотки, таблица которой показана на рисунке 28.2, шаги составляют:  $y_1 = 4$ ,  $y = 1$ .

Первая секционная сторона для 1-й секции укладывается в верхний слой первого паза, а вторая сторона – соответственно в нижний слой  $1 + y_1 =$

$$=1+4 = 5 \text{ н пятого паза.}$$

С первой секцией последовательно соединяется вторая. Верхняя секционная сторона 2-й секции укладывается в  $1в + у = 1+1 = 2в$ , т.е. в верхний слой второго паза и т.д.

Если нумерация секционных сторон в таблице выполнена верно, то для двухслойной обмотки номер каждого паза должен повториться дважды – для верхнего и нижнего слоя паза.

Развернутая схема обмотки якоря строится в соответствии с таблицей соединения секционных сторон. При этом необходимо соблюдение следующих правил:

- пазовая часть обмотки якоря изображается в виде двух параллельных линий (на каждый элементарный паз) – сплошной и штриховой, соответствующих верхнему и нижнему слою (стороне) паза. Номер паза совпадает с номером секции, уложенной в верхний слой этого паза.
- коллектор изображается в виде коллекторных пластин, причем номер коллекторной пластины соответствует номеру секции, начало которой соединяется с данной пластиной.
- для того, чтобы лобовые части секций были симметричными, нумерация коллекторных пластин должна быть сдвинута по направлению намотки (вправо) относительно нумерации пазов на половину полюсного деления

$$\tau = \frac{Z_z}{2p} \quad (18.5)$$

На коллектор накладываются щетки, полярность которых чередуется, а количество равно числу полюсов  $2p$ .

Расстояние между соседними щетками должно быть равно  $\tau$ , щетки одной полярности соединяются между собой.

На развернутой схеме необходимо показать штриховой линией  $1 \div 2$  уравнивающих соединения, соединяющих равнопотенциальные точки лобовых частей с шагом  $y_y = Z/p$ .

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Какие виды якорных обмоток машины постоянного тока вы знаете?
2. Какие шаги необходимо определить при построении якорной обмотки?
3. Какая обмотка является равносекционной, какая ступенчатой?

### **Задачи**

Каждый студент получает индивидуальное задание по расчету обмотки и, выполняет все расчеты и построения.

**Практическая работа №8. Параметры и режимы работы машин постоянного тока. Расчет магнитной цепи машины при холостом ходе и нагрузке.**

**Цель занятия:** Научиться расчёту магнитной цепи машины при холостом ходе и нагрузке

**Основы теории:**

ЭДС параллельной ветви обмотки якоря

$$E_a = 4f\omega\Phi = C_0 * \omega * \Phi \quad (19.1)$$

где  $f$  – частота ЭДС обмотки якоря;

$w$  – число витков в параллельной ветви обмотки якоря

$$w = \frac{N}{4a} \quad (19.2)$$

$C_0$  – постоянный коэффициент

$$C_0 = \frac{pN}{2\pi a} \quad (19.3)$$

$\Phi$  – магнитный поток на один полюс

$$\Phi = B_\delta * l_\delta * b_\delta \quad (19.4)$$

где  $B_\delta$  – магнитная индукция в зазоре;

$l_\delta$  – расчетная длина якоря;

$b_\delta$  – расчетная полюсная дуга.

Магнитный поток при холостом ходе

$$\Phi_\emptyset = a_\delta * \tau * l_\delta * B_\delta \quad (19.5)$$

где  $a_\delta$  – коэффициент полюсного перекрытия

$$a_\delta = b_\delta / \tau \quad (19.6)$$

Результирующая МДС при холостом ходе

$$F_B = F_\delta + F_z + F_a + F_m + F_s = F_{\delta z} + F_m + F_s \quad (19.7)$$

где  $F_{\delta z}$  магнитное напряжение зазора, зубцов и ярма якоря;

$F_m$  – магнитное напряжение сердечника полюса;

$F_s$  – магнитное напряжение станины.

Уравнение напряжения якоря при нагрузке:

– для генератора постоянного тока

$$U_\Gamma = E - I_a R_a \quad (19.8)$$

– для двигателя постоянного тока

$$U_d = E + I_a R_a \quad (19.9)$$

*Пример 1.* Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения номинальной мощностью  $P_n = 100$  кВт включен в сеть с напряжением  $U_c = 440$  В; КПД двигателя  $\eta = 89$  %; обмотка якоря простая волновая ( $2a = 2$ ); с числом полюсов  $2p = 4$ , число активных проводников  $N = 280$ ; ток в обмотке возбуждения  $I_\phi = 0,02 I_{an}$ , величина одностороннего воздушного зазора  $\delta = 2$  мм; магнитная индукция в зазоре  $B_\delta = 0,82$  Тл; магнитная индукция в зубцах якоря  $B_z = 2,2$  Тл; коэффициент воздушного зазора  $k_\delta = 1,3$ ; коэффициент магнитного насыщения магнитопровода двигателя  $k_\mu = 1,35$ .

Определить МДС реакции якоря по поперечной оси  $F_{qd}$  и число витков в полюсной катушке возбуждения  $w_\phi$ , необходимое для компенсации реакции якоря по поперечной оси при номинальной нагрузке двигателя.

*Решение:*

Ток, потребляемый двигателем в номинальном режиме

$$I_n = \frac{P_n}{U_c \eta} = \frac{100 \cdot 10^3}{440 \cdot 0,89} = 255 \text{ А.}$$

Ток в обмотке возбуждения

$$I_\phi = 0,02 \cdot I_n = 0,02 \cdot 255 = 5 \text{ А.}$$

Ток в цепи якоря при номинальной нагрузке

$$I_{an} = 255 + 5 = 260 \text{ А.}$$

Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_\delta = 0,8 \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_\delta \cdot 10^3 = 0,8 \cdot 0,82 \cdot 2 \cdot 1,3 \cdot 10^3 = 1700 \text{ В.}$$

МДС обмотки возбуждения в режиме холостого хода на пару полюсов

$$F_{\phi 0} = 2 F_\delta \cdot k_\mu = 2 \cdot 1700 \cdot 1,35 = 4590 \text{ А.}$$

МДС якоря на пару полюсов в режиме номинальной нагрузки

Коэффициент реакции якоря по поперечной оси при  $B_z = 2,2$  Тл и  $F_d/F_{\phi 0} = 8750/4590 = 1,9$  коэффициент  $k_{pa} = 0,22$ .

Приращение МДС возбуждения, компенсирующее влияние реакции якоря по поперечной оси,

$$F_{qd} = k_{pa} \cdot F_{an} = 0,22 \cdot 8750 = 1925 \text{ А.}$$

МДС возбуждения на пару полюсов при номинальной нагрузке двигателя, достаточное для компенсации влияния реакции якоря,

$$F_{\phi n} = F_{\phi 0} + F_{qd} = 4590 + 1925 = 6515 \text{ А.}$$

Число витков в полюсной катушке обмотки возбуждения



$$w = \frac{F_{\text{вн}}}{2I_{\text{в}}} = \frac{6515}{2 \cdot 5} = 651 \text{ виток}$$

### Контрольные вопросы и задания

1. Поясните физическую сущность реакции якоря МПТ. От чего зависит характер реакции якоря?
2. Каким образом учитывается размагничивающее действие поперечной реакции якоря в инженерных расчетах?
3. Как рассчитать напряжение на зажимах генератора постоянного тока, и двигателя постоянного тока?
4. Что определяет магнитный поток на полюс в машине постоянного тока?

### Задачи

1. Определить ЭДС параллельной ветви простой волновой обмотки якоря четырехполюсной машины постоянного тока, если число эффективных проводников якоря  $N = 920$ , частота вращения  $n = 1500$  об/мин, магнитный поток на полюс  $\Phi = 0,425 \cdot 10^{-2}$  Вб.
2. При частоте вращения якоря  $n = 1500$  об/мин ЭДС машины постоянного тока равна 115 В. Найти величину и частоту ЭДС обмотки якоря при частотах вращения: 1000, 750, 600 об/мин. Число пар полюсов машины  $2p = 2$ .
3. ЭДС машины постоянного тока  $E = 225$  В. Определить напряжение для режима генератора и двигателя при токе якоря  $I_a = 500$  А, если сопротивление цепи якоря  $R_a = 0,01$  Ом.
4. Магнитный поток на полюс машины постоянного тока при номинальном возбуждении  $\Phi = 1,29 \cdot 10^{-2}$  Вб, постоянный коэффициент  $C_0 = 126$ . Определить напряжение машины в генераторном режиме при номинальном токе 100 А, если частота вращения якоря  $n = 1500$  об/мин, сопротивление цепи якоря  $R_a = 0,25$  Ом.
5. Генератор постоянного тока нагружен на сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}} = 0,44$  Ом, напряжение генератора 220 В, сопротивление цепи якоря  $R_a = 0,01$  Ом. Определить частоту вращения якоря генератора, если магнитный поток  $\Phi = 2,96 \cdot 10^{-2}$  Вб, число эффективных проводников  $N = 304$ , обмотка якоря простая петлевая.

**Практическая работа №9. Параметры и режимы работы машин постоянного тока. Режимы работы машины постоянного тока.**

**Цель занятия:** Изучить режимы работы машин постоянного тока.

**Основы теории:**

Машина постоянного тока является обратимой, т.е. может работать в генераторном и двигательном режимах.

При работе машины в генераторном режиме механическая мощность, подводимая к валу машины:

$$P_1 = M_1 * \omega \quad (20.1)$$

где  $M_1$  – вращающий момент первичного двигателя.

Механическая мощность, преобразуемая электромагнитным путем в электромагнитную мощность:

$$P_{\text{мех}} = P_1 - p_T - p_M - p_d = P_{\text{эм}} \quad (20.2)$$

где  $p_T$  – механические потери;

$p_M$  – магнитные потери в зубцах и ярме якоря;

$p_d$  – добавочные потери.

Электромагнитная мощность:

$$P_{\text{эм}} = c_0 * I_a * \Phi * \omega = E * I_a \quad (20.3)$$

Электрическая мощность, снимаемая со щеток якоря:

$$P_a = P_{\text{эм}} - p_{\Sigma} = UI_a \quad (20.4)$$

где  $p_{\Sigma} = R_a I_a^2$  – электрические потери в цепи якоря.

Полезная электрическая мощность:

$$P = P_a - P_B = UI \quad (20.5)$$

где  $P_B = R_B * I_B^2$  – мощность, расходуемая на питание обмотки независимого (параллельного) возбуждения.

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = P/P_1 = 1 - \frac{\Sigma P}{(P_1 + \Sigma P)} \quad (20.6)$$

где  $\Sigma P = p_T + p_d + p_{\Sigma} + P_B$  – сумма потерь.

В режиме двигателя  $U > E$ , ток  $I_A < 0$ , поэтому мощность  $P_1, P_{\text{мех}}, P_{\text{ЭМ}}, P$  и моменты  $M_1$  и  $M_2$  получаются отрицательными и полезная механическая мощность  $P_1$  меньше потребляемой из сети электрической мощности  $P$  на потери в машине  $\Sigma P$ .

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = P_1/P = 1 - \frac{\Sigma P}{(P_1 + \Sigma P)} \quad (20.7)$$

*Пример 1.* Номинальная мощность двигателя постоянного тока  $P_n = 25$  кВт, напряжение питания цепи якоря  $U_n = 440$  В, напряжение питания цепи возбуждения  $U_\phi = 220$  В, частота вращения якоря в номинальном режиме  $n_n = 2200$  об/мин, сопротивление цепи якоря  $r = 0,3$  Ом, цепи возбуждения  $r_\phi = 60$  Ом, падение напряжения в щеточном контакте при номинальном токе  $\Delta U_{\text{щ}} = 2$  В, номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки  $\Delta U_{\text{щ}} = 2$  В, ток якоря в режиме холостого хода  $I_0 = 6$  А.

*Решение:*

Частота вращения в режиме холостого хода

$$n \approx n_1 \approx n / 100 \approx 2200 / 100 \approx 2376 \text{ об/мин.}$$

ЭДС якоря в режиме холостого хода (падением напряжения в щеточном контакте пренебрегаем ввиду его незначительной величины в режиме холостого хода):

$$E_{a0} = U_n - I_0 \Sigma r \approx 440 - 6 \cdot 0,3 \approx 438,2 \text{ В.}$$

Момент в режиме холостого хода

$$M_0 \approx 9,55 \cdot 438,2 \cdot 6 / 2376 \approx 10,6 \text{ Н·м.}$$

Момент на валу двигателя в режиме номинальной нагрузки

$$M_{2H} \approx 9,55 P_n / n_n \approx 9,55 \cdot 25 \cdot 10^3 / 2200 \approx 108,5 \text{ Н·м.}$$

Электромагнитный момент двигателя при номинальной нагрузке:

$$M_H = M_0 + M_{2H} \approx 10,6 + 108,5 \approx 119 \text{ Н·м}$$

Электромагнитная мощность двигателя в режиме номинальной нагрузки:

$$P_{\text{ЭМ.Н}} = 0,105 M_H \cdot n_n \approx 0,105 \cdot 119 \cdot 2200 \approx 17490 \text{ Вт.}$$

ЭДС якоря в режиме холостого хода:

$$E_{a0} = c_e \Phi n_0, \text{ откуда } c_m \Phi = E_{a0} / n_0 \approx 438,2 / 2376 \approx 0,185,$$

но так как  $c_m / c_e \approx 9,55$ , то

$$c_m \Phi = 9,55 c_e \Phi \approx 9,55 \cdot 0,185 \approx 1,77.$$

Из выражения электромагнитного момента в режиме номинальной нагрузки

$$M_H = c_m \cdot \Phi \cdot I_{aH}$$

определим значение тока якоря в режиме номинальной нагрузки:

$$I_{aH} = M_H / c_m \Phi \approx 119 / 1,77 \approx 67 \text{ А.}$$

Сумма магнитных и механических потерь двигателя пропорциональна моменту холостого хода:

$$p_{\text{мг}} + p_{\text{мех}} = 0.105 M_0 * n_0 = 0.105 * 10.6 = 2376 = 2644 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в цепи обмотки якоря:

$$p_{a\varepsilon} = I_{aH}^2 * \Sigma_r = 67^2 * 0.3 = 1347 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в щеточном контакте якоря:

$$P_{\text{щ,э}} = I_{aH} * \Delta U_{\text{щ}} = 67 * 2 = 134 \text{ Вт.}$$

Мощность, подводимая к цепи якоря, в номинальном режиме:

$$P_{1aH} = U_H * I_{aH} = 440 * 67 = 29480 \text{ Вт.}$$

Ток в обмотке возбуждения:

$$I_B = U_B / r_B = 220 / 60 = 3.7 \text{ А.}$$

Мощность в цепи возбуждения

$$P_B = U_B / I_B = 220 * 3.7 = 814 \text{ Вт.}$$

Мощность, потребляемая двигателем в режиме номинальной нагрузки:

$$P_{1H} = P_{1aH} + P_B = 29480 + 814 = 30295 \text{ Вт.}$$

КПД двигателя в номинальном режиме:

$$\eta_H = (P_H / P_{1H}) * 100 = 25 * 10^3 / 30.3 * 10^3 = 82.5 \text{ \%}.$$

### Контрольные вопросы и задания

1. Какой вид имеет энергетическая диаграмма ГПТ и ДПТ?
2. Какие потери в машинах постоянного тока являются механическими?
3. Где происходят магнитные потери мощности?
4. Где происходят электрические потери в машинах постоянного тока?

### Задачи

1. Генератор постоянного тока независимого возбуждения с номинальным напряжением  $U_H = 230 \text{ В}$  и номинальной частотой вращения  $n_H = 1500 \text{ об/мин}$  имеет простую петлевую обмотку якоря, состоящую из  $N = 200$  проводников. Число полюсов генератора  $2p = 4$ , сопротивление обмоток якоря при рабочей температуре  $r_a = 0.175 \text{ Ом}$ , основной магнитный поток  $\Phi = 4.8 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$ . Для номинального режима работы генератора определить: ЭДС якоря  $E_{aH}$ , ток нагрузки  $I_{aH}$ , электромагнитную мощность  $P_{эм}$  и электромагнитный момент  $M_{эм}$ . Размагничивающим действием реакции якоря пренебречь.

2. В шестиполусной машине постоянного тока поток возбуждения  $\Phi_B = 0.01 \text{ Вб}$ , якорь вращается с частотой  $n = 60 \text{ об/мин}$ . Определить среднее значение ЭДС, индуциру-

емой в проводнике обмотки якоря.

3. ЭДС генератора независимого возбуждения  $E_a = 240$  В, сопротивление якорной обмотки  $r = 0,1$  Ом. Определить напряжение на щетках генератора при токе нагрузки  $I_H = 100$  А.

4. Мощность, потребляемая генератором постоянного тока от приводного двигателя,  $P_1 = 50$  кВт, суммарные потери мощности в генераторе  $\Sigma P = 5$  кВт. Определить коэффициент полезного действия генератора.

5. При частоте вращения  $n = 975$  об/мин двигатель постоянного тока отдает полезную мощность  $P_2 = 5$  кВт. Определить полезный момент двигателя.

6. Для генератора постоянного тока независимого возбуждения известны технические данные: номинальное напряжение  $U_H = 230$  В, потребляемая мощность  $P_1 = 45$  кВт, ток возбуждения  $I_B = 20$  А, сопротивление обмотки возбуждения и якоря соответственно  $r_B = 100$  Ом и  $r_a = 0,12$  Ом, коэффициент полезного действия  $= 0,865$ . Определить ЭДС якорной обмотки  $E_a$ , электромагнитную мощность  $P_{эм}$ , потери в обмотке возбуждения  $P_{эл.В}$ , суммарные потери мощности  $\Sigma P$ .

7. Генератор параллельного возбуждения работает на сеть напряжением  $U_H = 120$  В. Сопротивления обмоток якоря и возбуждения в рабочем режиме  $r_a = 0,08$  Ом,  $r_B = 18$  Ом, сопротивление нагрузки  $r_n = 1,2$  Ом. Определить: ток нагрузки генератора, ток в цепи возбуждения, ток якоря, ЭДС генератора, полезную мощность

**Практическая работа №10. Магнитодвижущие силы обмоток и магнитные поля машин переменного тока. Электромагнитные процессы в асинхронных машинах при холостом ходе.**

**Цель занятия.** Изучить электромагнитные процессы в асинхронных машинах при холостом ходе.

**Основы теории**

При неподвижном роторе асинхронная машина (АМ) представляет собой трансформатор, отличающийся от обычного трансформатора по конструкции (распределённая обмотка на статоре и роторе, наличие зазора и т.п.). С физической точки зрения неподвижная АМ и трансформатор эквивалентны. Поэтому изучения АМ начинается со случая, когда  $n_2=0$  а режим работы – холостой ход.

Пусть ротор АМ имеет фазное исполнение, и его обмотка разомкнута, а статор включён на сеть с напряжением  $U_1$  и частотой  $f_1$ . Этот режим эквивалентен трансформатору при холостом ходе, причём первичная обмотка – это статор, вторичная ротор. Под действием напряжения  $U_1$  по обмотке статора протекает ток холостого хода, создающий магнитный поток, имеющий две

составляющие:

$\Phi_m$  – основной поток,

$\Phi_{\sigma 1}$  – поток рассеяния статора. Скорость

вращения потока  $n_1$  определяется частотой питающей сети:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (11.1)$$

Основной поток создаёт в обеих обмотках ЭДС:

статора

$$E_1 = \sqrt{2} \omega_1 k_{o\sigma 1} \Phi_m; \quad (11.2)$$

ротора

$$E_2 = 2 \omega_1 k_{o\sigma 2} \Phi_m. \quad (11.3)$$

Поток рассеяния создаёт в статоре ЭДС:

$$E_{\sigma 1} = j I_0 x_{\sigma 1} \quad (11.4)$$

Где  $x_{\sigma 1}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора. Статор обладает и активным сопротивлением, учитывая которое (а, следовательно, и падение напряже-

ния в  $r_1$ ), можно записать уравнение напряжений для х.х. обмотки статора заторможенной АМ:

$$U = I_0 r_1 + j x_{\sigma 1} I_0 = E_1 \quad (11.5)$$

По аналогии с трансформатором обмотку ротора АМ приводят к обмотке статора, причём  $E_2' = E_1$ , а коэффициент приведения напряжений равен:

$$k_u = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1 * k_{o61}}{w_2 * k_{o62}} \quad (11.6)$$

Для приведённой неподвижной АМ можно построить схему замещения, аналогичную схеме замещения трансформатора тоже определяется конструктивными особенностями.

Реактивная составляющая тока холостого хода АД:

$$I_{0p} = \frac{m_1 * p * F_{0m}}{\sqrt{2} * m_1 * w_1 * k_{o61}} \quad (11.7)$$

где  $m_1$  – число фаз обмотки статора;

$p$  – число пар полюсов;

$F_{0m}$  – амплитуда МДС, образующей поток взаимной индукции  $\Phi_m$ .

Активная составляющая тока холостого хода:

$$I_{0a} = \frac{P_m}{m_1 * E_1} \quad (11.8)$$

где  $P_m$  – магнитные потери в магнитопроводе статора.

**Пример 1.** Принимая синусоидальное распределение индукции в зазоре, определить основной магнитный поток асинхронной машины при соединении обмоток статора звездой, если число последовательно соединенных витков фазы статора  $w_1 = 336$ , обмоточный коэффициент  $k_{o61} = 0,96$ . Напряжение сети  $U_c = 380$  В, частота  $f = 50$  Гц. Известно также, что падение напряжения на сопротивлениях статорной обмотки составляет 4 % от фазного напряжения.

*Решение:*

ЭДС фазы обмотки статора:

$$E_1 = U_{\phi} - \Delta U_{\phi} = \frac{380}{\sqrt{3}} - 0.04 \frac{380}{\sqrt{3}} = 210.86 \text{ В.}$$

Основной магнитный поток асинхронной машины:

$$\Phi_m = \frac{E_1}{\pi * \sqrt{2} * f_1 * w_1 * k_{o61}} = \frac{210.86}{3.14 * \sqrt{2} * 50 * 336 * 0.96} = 2,95 * 10^{-3} \text{ Вб.}$$

### Контрольные вопросы и задания:

1. Для чего необходимо приведение асинхронной машины к машине с неподвижным ротором?
2. Сравните режим холостого хода трансформатора с режимом холостого хода асинхронно машины.
3. Как определить составляющие тока холостого хода обмотки статора асинхронной машины?
4. Как определить коэффициент приведения по напряжению?
5. Как выглядит схема замещения неподвижной приведенной асинхронной машины?

### Задачи

1. Вычислить магнитный поток асинхронной машины при несинусоидальном распределении индукции, если фазная ЭДС, индуцированная в обмотке статора,  $E_1 = 365$  В, число витков фазы статора  $w_1 = 176$ , обмоточный коэффициент  $k_{об1} = 0,958$ , коэффициент насыщения зубцового слоя  $k_z = 1,2$ , частота тока  $f = 50$  Гц. Сравнить полученное значение магнитного потока с его величиной при ненасыщенной машине.
2. Найти ток идеального холостого хода четырехполюсного асинхронного двигателя по следующим данным: ЭДС, индуцированная в фазе статора,  $E_{1\phi} = 213$  В, МДС, образующая основной магнитный поток,  $F_{0m} = 457,5$  А; число витков обмотки статора  $w_1 = 126$ , обмоточный коэффициент  $k_{об1} = 0,96$ , магнитные потери в магнитопроводе статора  $P_m = 150$  Вт.
3. Реактивная составляющая тока холостого хода шестиполюсного асинхронного двигателя  $I_{0p} = 40$  А. Амплитуда МДС, образующей основной магнитный поток,  $F_{0m} = 1088$  А, обмоточный коэффициент обмотки статора  $k_{об1} = 0,886$ . Определить число витков в фазе обмотки статора.
4. ЭДС, индуцированная в фазе обмотки статора асинхронного двигателя при вращении ротора с той же частотой, что и поле статора,  $E_1 = 215$  В. Ток в статоре  $I_0 = 5,6$  А. Определить составляющие главного сопротивления обмотки статора, если магнитные потери в магнитопроводе статора  $P_m = 180$  Вт.



**Практическая работа №11. Электромагнитный момент и круговая диаграмма асинхронной машины. Электромагнитные процессы в асинхронных машинах при нагрузке.**

**Цель занятия.** Изучить электромагнитные процессы в асинхронных машинах при нагрузке.

**Основная часть:**

Скорость поля асинхронной машины  $n_1$  называют синхронной, потому что она постоянна и определяется  $f_1$ , а скорость ротора  $n_2$  – асинхронной, потому что она меньше, чем  $n_1$ .

Относительная разность скоростей вращения  $n_1$  и  $n_2$  называется скольжением  $s$ .

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (12.1)$$

В нормальных режимах АД  $s = 1,5 \div 7\%$

Скорость вращения ротора:

$$n_2 = n_1(1 - s) \quad (12.2)$$

Частота тока в обмотке ротора:

$$f_2 = sf_1 \quad (12.3)$$

Режимы работы асинхронной машины:

- 1) двигательный:  $0 < s < 1$ ;
- 2) генераторный:  $s < 0$ ;
- 3) тормозной (противовключение):  $s > 1$ .

Действующее значение ЭДС взаимной индукции в фазе вращающегося ротора:

$$E_{2s} = \sqrt{2} f_1 s \omega_2 k_{o\phi 2} \Phi_m = s E_2. \quad (12.4)$$

Действующее значение ЭДС рассеяния ротора:

$$E_{2s} = x_{2s} I_2 \quad (12.5)$$

где индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора при скольжении:

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_{2\sigma} = s x_2 \quad (12.6)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния неподвижного ротора:

$$x_2 = 2\pi f_1 L_{2\sigma}. \quad (12.7)$$

Ток в фазе ротора, обусловленный действием ЭДС вращения  $E_{2s}$ :

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} \quad (12.8)$$

Уравнение токов асинхронной машины:

$$I_1 = I_0 + I_2' \quad (12.9)$$

где  $I_2'$  – приведенный ток ротора

$$I_2' = \frac{I_2}{k_1} \quad (12.10)$$

где  $k_1$  – коэффициент приведения по току

$$k_1 = \frac{m_1 k_{\phi 1} w_1}{m_2 k_{\phi 2} w_2} \quad (12.11)$$

Коэффициенты приведения сопротивлений

$$k = k_U k_1 \quad (12.12)$$

Уравнение напряжений для режима КЗ АМ такое же, как и для трансформатора

$$\dot{U}_{1k} = -\dot{E}_{1k} + I_1 z_k \quad (12.13)$$

где  $z_k = z_1 + z_2'$

*Пример 1.* Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет следующие данные: максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре  $B_{\text{max}} = 1,5$  Тл, диаметр расточки статора  $D_1 = 180$  мм, длина сердечника статора  $l_1 = 141$  мм, число полюсов обмотки статора и ротора  $2p = 4$ , число последовательно соединенных витков в фазных обмотках статора  $w_1 = 48$ , ротора  $w_2 = 8$ , обмоточные коэффициенты статора и ротора  $k_{\phi 1} = k_{\phi 2} = 0,93$ . Определить фазные значения ЭДС в обмотке статора  $E_1$  и в обмотке ротора при неподвижном его состоянии  $E_2$  и вращающемся со скольжением  $s = 8 \%$ , частоту тока в неподвижном и вращающемся роторе. Частота тока питающей сети  $f_1 = 50$  Гц.

*Решение:*

Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D_1}{2p} = \frac{3.14 \cdot 180}{4} = 141 \text{ мм.}$$

Основной магнитный поток

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_{\text{max}} * I_1 * \tau = \frac{2}{3.14} 1.5 * 180 * 10^{-3} * 141 * 10^{-3} = 0.019 \text{ Вб}$$

ЭДС фазной обмотки статора

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{\phi 1} \Phi = 4,44 * 50 * 48 * 0,93 * 0,019 = 188 \text{ В.}$$

ЭДС в обмотке неподвижного ротора

$$E_2 = 4,44 f_1 w_2 k_{\phi 2} \Phi = 4,44 * 50 * 8 * 0,93 * 0,019 = 31 \text{ В.}$$

ЭДС во вращающемся роторе при скольжении

$$E_{2s} = s * E_2 = 0,08 * 31 = 2,5 \text{ В.}$$

Частота тока в неподвижном роторе  $f_2 = f_1 = 50$  Гц, частота во вращающемся роторе

$$f_2 = sf_1 = 0,08 \cdot 50 = 4 \text{ Гц.}$$

### Контрольные вопросы и задания

1. Каким скольжением определяется двигательный режим работы асинхронной машины?
2. Как определить ЭДС вращения?
3. Как определяется коэффициент приведения сопротивления роторной цепи?
4. Каким образом обмотку ротора АМ приводят к обмотке ротора, а вращающуюся машину к неподвижной?

### Задачи

1. Шестиполусная асинхронная машина питается от трехфазной сети с частотой 60 Гц. Скольжение машины равно 0,025. Найти угловую скорость и частоту вращения поля и ротора. Как изменятся эти величины при частоте 400 Гц? В каком режиме работает машина?
2. Ротор асинхронного двигателя вращается с угловой скоростью  $\omega = 298$  рад/с. В каком режиме и при каком скольжении будет работать машина в первый момент после переключения обмоток статора на противоположное направление вращения, если угловая скорость поля  $\omega_1 = 314$  рад/с?
3. Ротор трехфазного асинхронного двигателя вращается с частотой  $n = 1440$  об/мин. Определить ЭДС взаимной индукции в фазе ротора  $E_{2s}$ , если синхронная частота вращения  $n_1 = 1500$  об/мин, а ЭДС при неподвижном роторе  $E_2 = 200$  В.
4. ЭДС, индуцируемая в фазе ротора асинхронной машины при скольжении  $s = 0,03$ , равна 6 В. Найти ток в обмотке неподвижного ротора, если активное сопротивление фазы обмотки ротора  $r_2 = 0,01$  Ом, а индуктивность рассеяния  $L_{2\sigma} = 2,2 \cdot 10^{-4}$  Гн. Частота сети  $f_1 = 50$  Гц.
5. Активное сопротивление фазы обмотки ротора асинхронной машины с фазным ротором  $r_2 = 0,01$  Ом, ЭДС взаимной индукции в фазе ротора при неподвижном роторе  $E_2 = 212$  В, ток  $I_2 = 2400$  А. Определить индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора при скольжении  $s = 0,03$ .

**Практическая работа №12. Электромагнитный момент и круговая диаграмма асинхронной машины. Потери, КПД асинхронного двигателя.**

**Цель занятия.** Научиться расчёту потерь и КПД асинхронного двигателя.

**Основы теории:**

Из сети к первичной обмотке асинхронного двигателя подводится мощность:

$$P_1 = m_1 I_1 U_1 \cos \varphi_1 \quad (13.1)$$

Часть этой мощности теряется в виде электрических потерь в первичной обмотке

$$P_{эл1} = m_1 I_1^2 r_1 \quad (13.2)$$

а часть – в стали статора (магнитные потери)

$$P_{мг} = m_1 I_0^2 r_M = \frac{m_1 E_1^2}{r_M} \quad (13.3)$$

Оставшаяся часть передается электромагнитным способом на ротор, согласно схеме замещения (электромагнитная мощность)

$$P_{эм} = m_1 * I_2'^2 \frac{r_2}{s} = m_1 E_1 I_2' \cos \psi_2 \quad (13.4)$$

Часть  $P_{эм}$  теряется в виде тепла в обмотке ротора (электрические потери в обмотке ротора)

$$P_{эл2} = m_1 * I_2'^2 * r_2' = m_2 * I_2^2 * r_2 \quad (13.5)$$

оставшаяся часть превращается в механическую мощность, развиваемую на роторе

$$P_{мх} = P_{эм} - p_{эл2} = m_2 I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s} \quad (13.6)$$

часть  $P_{мх}$  теряется в машине в виде механических потерь  $p_{мх}$ .

Добавочные потери рассчитать очень трудно, поэтому их принимают равными 0,5% от  $P_1$  при  $I_1 = I_n$ .

Полезная мощность на валу

$$P_2 = P_{мх} - p_{мх} - p_d; \quad (13.7)$$

$$P_2 = P_1 - \Sigma p, \quad (13.8)$$

где суммарные потери

$$\Sigma p = p_{эл1} + p_{мг} + p_{эл2} + p_{мх} + p_d \quad (13.9)$$

КПД двигателя определяется как

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_1} \quad (13.10)$$

Из выражения для  $P_{эм}$  и  $p_{эл2}$  вытекают соотношения

$$P_{эл2} \approx s P_{эм}; \quad (13.11)$$

$$P_{мх} \approx (1-s) P_{эм}. \quad (13.12)$$

из которых видно, что при  $s = 0$  потерь в роторе нет (идеальный холостой ход), а при  $s = 1$  вся  $P_{эм}$  идет на потери в обмотке ротора, а  $P_{мх} = 0$ . Поэтому с точки зрения КПД чем меньше  $s$ , тем лучше ( $s_H \approx 0,02 \approx 0,05$ ).

**Пример 1.** Асинхронный трехфазный двигатель при напряжении сети  $U_c \approx 380$  В развивает номинальную мощность  $P_H = 10$  кВт, вращаясь с частотой  $n_H = 2920$  об/мин и потребляя ток  $I_{1H} = 18,6$  А при коэффициенте мощности  $\cos \varphi_H \approx 0,913$ . В режиме холостого хода двигатель потребляет из сети мощность  $P_0 = 325$  Вт при токе  $I_0 = 5,04$  А. Активное сопротивление обмотки статора  $r_1 = 0,326$  Ом, механические потери мощности  $p_{мх} = 130$  Вт. Схема соединения обмотки статора – «звезда». Определить потери мощности в меди статора и ротора, потери в стали, добавочные потери при нагрузке, коэффициент полезного действия АД.

*Решение:*

При решении задачи принято допущение, что сумма потерь в стали и механических потерь – величина постоянная.

Потери в стали:

$$P_{ст} \approx P_0 \approx m_1 I_0^2 \approx p_{мх} \approx 325 \approx 3 \approx 5,04^2 \approx 130 \approx 170 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в обмотке статора:

$$p_{эл1} = m_1 I_H^2 r_1 = 3 \approx 18,6^2 \approx 0,326 \approx 338 \text{ Вт.}$$

Потребляемая из сети мощность:

$$P_1 \approx \sqrt{3} \approx U_{1H} \approx I_{1H} \approx \cos \varphi_H \approx 380 \approx 18,6 \approx 0,913 \approx 11163,8 \text{ Вт.}$$

Электромагнитная мощность:

$$P_{эм} \approx P_1 \approx P_{ст} \approx p_{эл1} \approx 11163,8 \approx 170 \approx 338 \approx 10655,8 \text{ Вт}$$

Электрические потери в обмотке ротора:

$$P_{эл2} = S * P_{эм} = 0.027 * 10655,8 = 287.7 \text{ Вт.}$$

где при частоте вращения магнитного поля статора  $n_1 = 3000$  об/мин скольжение

$$s = \frac{n_1 - n_H}{n_1} = \frac{3000 - 2900}{3000} = 0.027$$

Добавочные потери:

$$P_D \approx P_{эм} \approx P_H \approx p_{эл2} \approx p_{мх} \approx 10655,8 \approx 10000 \approx 287,7 \approx 130 \approx 238 \text{ Вт}$$

Суммарные потери мощности:

$$\approx p \approx p_{эл1} \approx p_{эл2} \approx P_{ст} \approx p_{мх} \approx P_D \approx 338 \approx 287,7 \approx 170 \approx 130 \approx 238 \approx 1163,8$$

Вт.

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} * 100\% = \frac{10000}{11163.8} * 100\% = 89.6\%$$

### Контрольные вопросы и задания

1. Какие потери в асинхронном двигателе относятся к постоянным потерям, а какие к переменным?
2. Какие потери относятся к механическим потерям в асинхронном двигателе?
3. Чем определяются добавочные потери в АД и как они рассчитываются?
4. Перечислите все виды потерь мощности в асинхронном двигателе.
5. Какова зависимость между электрическими потерями в обмотке ротора АД и электромагнитной мощностью?

### Задачи

1. Электрические потери в обмотке статора АД  $p_{эл1} = 500$  Вт. Мощность, подводимая к двигателю, 13,8 кВт. Определить электромагнитную мощность, мощность на валу двигателя, электрические потери в обмотке ротора, механические и добавочные потери, если четырехполюсный двигатель вращается с частотой  $n = 1450$  об/мин, КПД машины  $\eta = 87\%$ . Частота сети 50 Гц, Магнитные потери в магнитопроводе статора принять равными  $2/3$  от электрических потерь в обмотке статора.
2. Асинхронный двигатель при напряжении сети 380 В в режиме холостого хода потребляет из сети ток 30 А с коэффициентом мощности 0,09. Активное сопротивление фазы шестиполюсной обмотки статора, соединенной в звезду, равно 0,07 Ом. Под номинальной нагрузкой двигатель потребляет из сети активную мощность 145 кВт при коэффициенте мощности 0,88 и вращается с частотой  $n = 965$  об/мин. Пренебрегая механическими и добавочными потерями, определить полезный вращающий момент на валу двигателя. Частота питающей сети  $f = 50$  Гц.
3. Потребляемая асинхронным двигателем мощность 16,7 кВт, напряжение сети 380 В, коэффициент мощности 0,88. Активное сопротивление обмотки статора, измеренное между ее линейными выводами, 0,56 Ом. Скольжение – 0,033. Предположим, что магнитные потери в сердечнике статора равны половине электрических потерь в обмотке статора, механические и добавочные потери составляют 5 % от суммарных потерь. Определить полезную мощность и коэффициент полезного действия двигателя.
4. Электромагнитная мощность асинхронного двигателя  $P_{эм} = 500$  Вт, полная

механическая мощность  $P_{\text{мх}} = 470$  Вт. Найти скольжение, при котором работает двигатель, и электрические потери в роторе.

5. Четырехполюсный АД с фазным ротором при напряжении сети 380 В в режиме холостого хода вращается с частотой 1500 об/мин и при коэффициенте мощности 0,08 потребляет из сети ток 25 А. Активное сопротивление фазы обмотки статора, соединенной в звезду, равно 0,02 Ом. Обмотка ротора включена в треугольник. Сопротивление обмотки ротора, измеренное на кольцах, равно 0,008 Ом. Под номинальной нагрузкой двигатель потребляет из сети 110,5 кВт при коэффициенте мощности 0,85, линейный ток в роторной цепи 278,5 А. Предполагая, что механические потери равны магнитным потерям в сердечнике статора, определить скорость вращения ротора в номинальном режиме.

**Практическая работа №13. Принцип действия и рабочий процесс трехфазной асинхронной машины. Механическая характеристика асинхронного двигателя.**

**Цель занятия.** Научиться рассчитывать механическую характеристику асинхронного двигателя.

**Основы теории:**

Механической характеристикой называется зависимость электромагнитного момента от скольжения  $M_{эм} = f(s)$ , при  $U_1, f_1 = \text{const}$ .

Известно, что

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_1} \quad (14.1)$$

где

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} \quad (14.2)$$

Уравнение механической характеристики

$$M_{эм} = \frac{pm_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1 \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2 \right]} \quad (14.3)$$

где

$$\omega_1 = 2\pi f_1 \quad (14.4)$$

Скольжение, при котором  $M_{эм}$  достигает максимальных значений  $\pm M_m$ , называется критическим  $\pm s_{кр}$ .

$$s_{кр} = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2}} \quad (14.5)$$

Обычно в знаменателе  $r_1$  по сравнению с  $x_{\sigma 1}$  и  $x'_{\sigma 2}$  мало и можно получить

$$s_{кр} = \pm \frac{r_2'}{(x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})} \quad (14.6)$$

Максимальный момент двигателя

$$M_m \cong \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})} \quad (14.7)$$

Для практического построения механической характеристики часто используют формулу Клосса, которая определяет связь между текущим значением  $M_{эм}$  и  $M_m$ , согласно которой



$$\frac{M_{эм}}{M_m} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} \quad (14.8)$$

Начальный пусковой момент

$$M_n = \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{\omega_1 [(r_1 + r_2')^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2]} \quad (14.9)$$

Эксплуатационная механическая характеристика АД – это зависимость  $M_2 = f(n_2)$ , а чаще  $n_2 = f(M_2)$ , имеет вид:

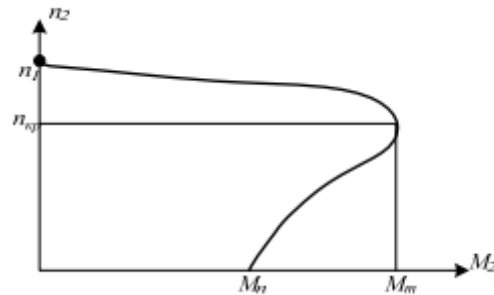


Рисунок 14.1 – Эксплуатационная механическая характеристика АД

*Пример 1.* Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии А2, работающий от сети частотой 50 Гц напряжением 380 В. при соединении обмотки статора «звездой», имеет номинальные параметры: полезная мощность  $P_n = 22$  кВт, частота вращения  $n_n = 1455$  об/мин, КПД = 90 %, коэффициент мощности  $\cos \varphi_{1H} = 0,88$ , кратность пускового тока  $I_n/I_n = 7$ , кратность пускового момента  $M_n/M_n = 1,2$  и максимального момента  $M_m/M_n = 2$ , активное сопротивление фазной обмотки статора 0,21 Ом. Требуется рассчитать параметры и построить механическую характеристику двигателя  $n_2 = f(M)$ . Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания принять равным  $\cos \varphi_K = 0,5 \cos \varphi_{1H}$

*Решение:*

Потребляемая двигателем мощность в режиме номинальной нагрузки

$$P_{1H} = P_n / \eta = 22 / 0,9 = 24,4 \text{ кВт.}$$

Потребляемый двигателем ток в режиме номинальной нагрузки

$$I_{1H} = \frac{P_{1H}}{3 \cdot U_{1\phi} \cos \varphi_{1H}} = \frac{24400}{3 \cdot 220 \cdot 0,88} = 42 \text{ А}$$

Пусковой ток двигателя

$$I_n = I_{1H} \frac{I_n}{I_{1H}} = 42 \cdot 7 = 294 \text{ А}$$

Сопротивление короткого замыкания двигателя

$$z_k = \frac{U_{1\phi}}{I_n} = \frac{5220}{294} = 0.75 \text{ Ом}$$

Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания

$$\cos \varphi_K = 0,5 \div 0,88 \div 0,44 \quad \sin \varphi_K = 0,895 .$$

Активная и индуктивная составляющие сопротивления короткого замыкания

$$r_K = z_K \sin \varphi_K = 0,75 \div 0,895 \div 0,67 \text{ Ом};$$

$$x_K = z_K \cos \varphi_K = 0,75 \div 0,44 \div 0,33 \text{ Ом}.$$

Скольжение в режиме номинальной нагрузки

$$s_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1} = \frac{1500 - 1455}{1500} = 0,03$$

Приведенное значение активного сопротивления фазы обмотки ротора

$$r'_2 = r_K - r_1 = 0,33 - 0,21 = 0,12 \text{ Ом}$$

Номинальное значение электромагнитного момента

$$M = \frac{pm_1 U_1^2 r'_2 / s_H}{2\pi f_1 [(r_1 + r'_2 / s_H)^2 + x_K^2]} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 220^2 \cdot 0,12 / 0,03}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 [(0,21 + 0,12 / 0,03)^2 + 0,67^2]} = 204 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Максимальный момент

$$M_m = M \cdot \frac{M_m}{M} = 204 \cdot 2 = 408 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Пусковой момент

$$M_n = 204 \cdot 1,2 = 245 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Критическое скольжение

$$s_{кр} = s_H \left[ \frac{M_m}{M} + \sqrt{(M_m/M)^2 - 1} \right] = 0,03 [2 + \sqrt{2^2 - 1}] = 0,11$$

Момент при скольжении  $s = 0,5$

$$M = \frac{pm_1 U_1^2 r'_2 / s_H}{2\pi f_1 [(r_1 + r'_2 / s_H)^2 + x_K^2]} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 220^2 \cdot 0,12 / 0,5}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 [(0,21 + 0,12 / 0,5)^2 + 0,67^2]} = 341 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Рассчитав частоту вращения по формуле

$$n_2 = n_1 (1 - s)$$

Таблица 14.1 – Результаты расчета механической характеристики

| Номер                       | 1    | 2    | 3    | 4   | 5   |
|-----------------------------|------|------|------|-----|-----|
| Скольжение                  | 0    | 0,03 | 0,11 | 0,5 | 1   |
| Частота вращения,<br>об/мин | 1500 | 1455 | 1335 | 750 | 0   |
| Момент, Н·м                 | 0    | 204  | 410  | 341 | 245 |

По результатам расчета построить механическую характеристику  $n_2 = f(M)$ .

### Контрольные вопросы и задания

1. Какая характеристика называется механической?
2. Поясните физический смысл механических характеристик АМ.
3. Какое скольжение соответствует максимальному моменту асинхронного двигателя, как его рассчитать?
4. Чему равно скольжение в момент пуска асинхронного двигателя?

### Задачи

1. Определить приведенное активное сопротивление обмотки ротора трехфазного четырехполюсного асинхронного двигателя, имеющего номинальную мощность 110 кВт, номинальную частоту вращения  $n = 1470$  об/мин, номинальное фазное напряжение  $U_{1n} = 220$  В, частоту  $f_1 = 50$  Гц, кратность максимального момента  $M_m/M_n = 2$ , активное сопротивление обмотки статора  $r_1 = 0,021$  Ом.
2. Двухполюсный трехфазный асинхронный двигатель в номинальном режиме потребляет мощность  $P_1 = 12,5$  кВт при частоте вращения  $n = 2930$  об/мин. Частота сети 50 Гц. Построить механическую характеристику двигателя по следующим данным: кратность максимального момента  $M_m/M_n = 2,2$ , КПД  $\eta = 88\%$ .
3. При какой частоте вращения асинхронный двигатель развивает максимальный момент, если отношение максимального момента к номинальному моменту  $M_m/M_n = 2,2$ , а номинальная частота вращения шестиполюсного двигателя при частоте сети 50 Гц  $n = 983$  об/мин.
4. Четырехполюсный асинхронный двигатель при номинальной нагрузке потребляет из сети активную мощность  $P_1 = 16,9$  кВт. Номинальная частота вращения  $n = 1470$  об/мин, суммарные потери в двигателе  $\Sigma p = 1,9$  кВт. Отношение пускового момента к номинальному  $M_m/M_n = 1,1$ . Определить приведенное активное сопротивление обмотки ротора, если активное сопротивление обмотки статора  $r_1 = 1,1$  Ом, индуктивные сопротивления обмотки статора и ротора  $x_1 \approx x_2 \approx 5,2$  Ом. Частота сети  $f_1 = 50$  Гц.

**Практическая работа №14. Пуск в ход трехфазных асинхронных двигателей.  
Однофазный асинхронный двигатель.**

**Цель занятия.** Изучить строение и характеристики однофазного асинхронного двигателя.

**Основы теории:**

В тех случаях, когда потребление электрической энергии невелико (жилые дома, торговые предприятия и др.) или, когда трудно выполнить 3- фазную сеть (железные дороги, электрифицируемые на переменном токе), применяются однофазные сети. При этом возникает необходимость использования однофазных двигателей переменного тока.

Однофазный асинхронный двигатель имеет на статоре однофазную обмотку, а на роторе – короткозамкнутую обмотку в виде беличьей клетки. Можно представить, что 1- фазный асинхронный двигатель получается из 3- фазного путем отключения одной фазы статора.

Однофазный ток статора создает пульсирующее магнитное поле, которое можно разложить на 2 поля, имеющих равные амплитуды и вращающиеся в противоположные стороны.

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_{\text{пр}} - \dot{\Phi}_{\text{обр}} \quad (15.1)$$

$$\dot{\Phi}_{\text{пр}} = \dot{\Phi}_{\text{обр}} = \frac{1}{2} \dot{\Phi}_m \quad (15.2)$$

Прямое поле вращается с синхронной скоростью

$$n_{\text{пр}} = n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (15.3)$$

Обратное – с такой же скоростью, но с другим знаком.

$$n_{\text{обр}} = -n_1 \quad (15.4)$$

Прямая волна имеет по отношению к ротору скольжение

$$s_1 = s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (15.5)$$

Обратная волна по отношению к ротору имеет скольжение

$$s_2 = \frac{-n_1 - n}{-n_1} = 2 - s \quad (15.6)$$

Под действием прямого и обратного полей в роторе наводится ЭДС соответствующей частоты и протекают токи, которые, взаимодействуя со своими полями будут создавать вращающие моменты, противоположные по знаку. В момент пуска  $M_{\text{пр}} = -M_{\text{обр}}$ , поэтому результирующий пусковой момент равен нулю и однофазный асинхронный двига-

тель не может самостоятельно прийти во вращение при подключении его к сети, а нуждается в постороннем толчке.

При небольших  $s$  асинхронный двигатель развивает вращающий момент, равный  $M_n$ , но его надо подтолкнуть. Механическая характеристика однофазного асинхронного двигателя имеет вид суммы двух характеристик:

1)  $M_{np} = f(s)$ ; 2)  $M_{обр} = f(s)$ , получается при подстановке в уравнение механической характеристики вместо  $s$  величины  $2-s$  и с учетом того, что  $M_{np}$  и  $M_{обр}$  на характеристике имеют разные знаки

$$M_{обр} = - \frac{p m_1 U_1^2 * \frac{r_2'}{2-s}}{2\pi f_1 \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{2-s} \right)^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2 \right]} \quad (15.7)$$

Зависимость  $M_{эм} = f(s)$  однофазного асинхронного двигателя показывает, чтобы появился пусковой  $M_n$  необходимо во время пуска двигателя создать в нем вращающееся магнитное поле. Для этого на статоре двигателя помимо рабочей обмотки РО применяют ещё одну – пусковую. Эти обмотки располагают на статоре так, чтобы их оси были смещены на  $90^\circ$  эл в пространстве, а по ним протекали токи, сдвинутые во времени на  $90^\circ$ . Для получения временного сдвига в цепь пусковой обмотки включают фазосдвигающий элемент, в качестве которого используют:  $R$ ,  $L$  или  $C$ . При достижении частотой вращения значения близкого к номинальному, пусковую обмотку отключают с помощью реле. Таким образом, во время пуска – двигатель 2-х фазный, в рабочем режиме – однофазный.

### Контрольные вопросы и задания

1. Почему невозможен самостоятельный запуск однофазного асинхронного двигателя?
2. Что произойдет, если работающий трехфазный АД перейдет в однофазный режим (сгорит предохранитель в одной из фаз)?
3. Какое назначение имеет фазосдвигающий элемент в схемах включения однофазных АД?
4. Какое скольжение имеет обратная волна по отношению к ротору?

### Задачи

1. Частота вращения ротора однофазного асинхронного двигателя  $n = 1400$  об/мин, двигатель четырехполюсный. Частота питающей сети 50 Гц. С каким скольжением перемещается ротор по отношению к прямой и обратной волнам магнитных полей обмотки статора?

2. Определить электромагнитный момент однофазного четырехполюсного асинхронного двигателя при частоте вращения ротора  $n = 1390$  об/мин. Параметры схемы замещения:  $r_{1*} = r_{2*}' = 0.04; x_{1*} = x_{2*}'; r_{0*} = 0, x_{0*} = 2.8$ . Двигатель работает при напряжении  $U_{1*} = 1$  и частоте 50 Гц.

3. При работе трехфазного асинхронного двигателя оборвался один из линейных проводов. Оценить изменение линейного тока двигателя, если мощность на валу двигателя осталась неизменной.

4. Асинхронный конденсаторный двигатель при напряжении  $U_1 = 220$  В имеет в фазе, включенной непосредственно в сеть, ток  $I_B = 5,2 - j3$  А. Определить величину емкости, обеспечивающей получение кругового поля.

## **Практическая работа №15. Пуск в ход трехфазных асинхронных двигателей.**

### **Пусковые свойства асинхронного двигателя.**

**Цель занятия.** Расчёт пусковых характеристик АД.

#### **Основы теории:**

По типу ротора различают способы пуска двигателей с фазным и короткозамкнутым ротором.

Пуск двигателей с фазным ротором производится с помощью реостата в цепи ротора. Добавочное сопротивление  $r_d$  включается в цепь ротора с одной стороны для уменьшения пускового тока ротора, равного

$$r'_d = \frac{E'_2}{(r'_2 + r_d) + jx'_{2\sigma}} \quad (16.1)$$

а с другой – для увеличения пускового момента  $M_n$ . Причем  $r_d$  выбирается так, чтобы  $M_n = M_m$ , а  $s_{кр}=1$ , следовательно

$$s_{кр} \approx \frac{c_1(r'_2 + r'_d)}{x_{\sigma 1} + c_1 x'_{2\sigma}} \quad (16.2)$$

Откуда

$$\begin{aligned} r'_d &= x_k - r'_2 * C_1 / C_1 \\ r_d &= \frac{r'_d}{k^2} \end{aligned} \quad (16.3)$$

Начальный пусковой ток двигателя с фазным ротором

$$I_n \approx \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2)^2 + x_k^2}} \quad (16.4)$$

Начальный пусковой момент двигателя с фазным ротором

$$M_n = \frac{m_1 * U_1^2 * r'_2}{\omega_1 [(r_1 + r'_2)^2 + x_k^2]} \approx \frac{m_1 * I_n^2 * r'_2}{\omega_1} \quad (16.6)$$

Начальный пусковой момент максимальный, если сопротивление фазы обмотки ротора

$$r'_{2m} = \sqrt{r_1^2 + x_k^2} \approx x_k \quad (16.6)$$

Для расчета активного сопротивления добавочного резистора  $r_{доб}$ , необходимого для получения заданного повышенного скольжения  $s$  при заданной (номинальной) нагрузке:

$$r_d = r_2 (s/s_n - 1) \quad (16.7)$$

Способы пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: прямой, реакторный, автотрансформаторный, переключением «звезда–треугольник».

Прямой пуск –  $I_c = I_n$ ;  $M_{n.пр.} = M_n$ .

Пуск через реактор с индуктивным сопротивлением  $x_p$ :

$$I_c = I_n / \alpha; M_{n.p.} = M_n / \alpha^2 \quad (16.8)$$

где

$$\alpha = \sqrt{[r_k^2 + (x_k + x_p)^2] / (rk^2 + x_k^2)} \quad (16.9)$$

Пуск через автотрансформатор с коэффициентом трансформации  $k$

$$I_c = I_n / k^2; M_{п.ат.} = M_n / k^2 \quad (16.10)$$

*Пример 1.* Для асинхронного двигателя с фазным ротором, номинальная мощность  $P_n = 15$  кВт, номинальное скольжение  $s_n = 5$  %, перегрузочная способность  $\lambda = M_{max} / M_\mu \approx 3,0$ ; число полюсов  $2p = 8$ , сопротивление обмотки ротора  $r_2 = 0,37$  Ом. Рассчитать сопротивления резисторов трехступенчатого пускового реостата ПР (рис. 26.1).

*Решение:*

Номинальная частота вращения

$$n_n = n_1 (1 - s_n) \approx 750 \cdot 1 - 0,05 \approx 712 \text{ об/мин.}$$

Номинальный момент двигателя

$$M_\mu = 9.55 P_\mu / \eta_\mu \approx 9,55 \cdot 15000 / 712 \approx 201 \text{ Н·м.}$$

Принимаем значение момента переключений, равным номинальному

$$M_2 = 1.0 M_n \approx 1,0 \cdot 201 \approx 204 \text{ Н·м.}$$

Отношение начального пускового момента к моменту переключений принимаем

$$\lambda = M_1 / M_2 \approx 2,1.$$

Начальный пусковой момент

$$M_1 = M_2 \cdot \lambda \approx 201 \cdot 2,1 \approx 422 \text{ Н·м,}$$

т.е.  $M_1 / M_2 = 422 / (3 \cdot 201) = 0,7$ ; это позволяет применить аналитический метод расчета сопротивлений пускового реостата.



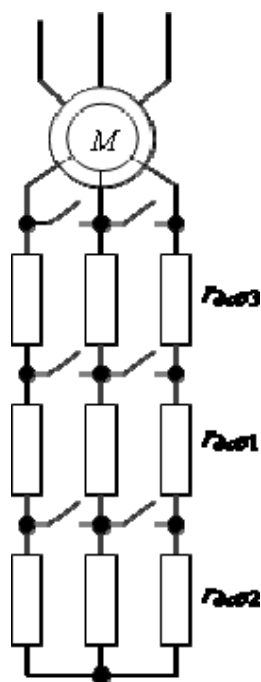


Рисунок 16.1 – Трехступенчатый пусковой реостат

Сопротивление резистора третьей ступени ПР

$$r_{доб3} = r_2 (\lambda - 1) \approx 0,37 / 2,1 \approx 1 \approx 0,41 \text{ Ом.}$$

Сопротивление резистора второй ступени ПР

$$r_{доб2} = r_{доб3} * \lambda \approx 0,41 \approx 2,1 \approx 0,86 \text{ Ом.}$$

Сопротивление резистора первой ступени

$$r_{доб1} = r_{доб2} * \lambda \approx 0,86 \approx 2,1 \approx 1,8 \text{ Ом.}$$

Сопротивление ПР на первой ступени

$$R_{ПР1} = r_{доб1} + r_{доб2} + r_{доб3} \approx 1,8 \approx 0,86 \approx 0,41 \approx 3,07 \text{ Ом.}$$

Сопротивление ПР на второй ступени

$$R_{ПР2} = r_{доб2} + r_{доб3} \approx 0,86 \approx 0,41 \approx 1,27 \text{ Ом.}$$

Сопротивление ПР на третьей ступени

$$R_{ПР3} = r_{доб3} \approx 0,41 \text{ Ом.}$$

### Контрольные вопросы и задания

1. Какие ограничения имеет прямой пуск в ход асинхронного двигателя?
2. Для чего нужен пусковой реостат в АД с фазным ротором?
3. Чем автотрансформаторный пуск АД предпочтительнее реакторного пуска?
4. Почему нежелателен реостатный пуск АД с короткозамкнутым ротором?

### Задачи

1. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором серии 4А имеют сле-

дующие данные каталога, приведенные в таблице 10.1: номинальная мощность  $P_n$ ; номинальное скольжение  $s_n$ ; КПД  $\eta_n$ ; коэффициент мощности  $\cos \varphi_n$ ; ток ротора  $I_{2n}$ ; ЭДС ротора  $E_2$ ; перегрузочная способность  $\lambda_m = M_{max}/M_n$

Определить: номинальный  $M_n$  и максимальный  $M_{max}$  моменты; критической скольжение  $s_{кр}$  в режиме естественной механической характеристики; сопротивление пускового реостата  $R_{ДР}$ , необходимого для получения кратности пускового момента  $M_{П}/M_n = 1,5$ , и сопротивление  $r_{доб}$ , требуемое для получения частоты вращения  $n_2 = 0,5 n_1$  при номинальном нагрузочном моменте.

Таблица 16.1 – Данные для задачи 1

| Тип двигателя | Величины    |      |           |              |                  |              |           |               |
|---------------|-------------|------|-----------|--------------|------------------|--------------|-----------|---------------|
|               | $P_n$ , кВт | $2p$ | $s_n$ , % | $\eta_n$ , % | $\cos \varphi_n$ | $I_{2n}$ , А | $E_2$ , В | $M_{max}/M_n$ |
| 4АНК225М8     | 30          | 8    | 5         | 86,5         | 0,8              | 165          | 120       | 1,8           |
| 4АНК250SM8    | 37          | 8    | 5,5       | 57,5         | 0,8              | 190          | 115       | 2,2           |
| 4АНК250И8     | 45          | 8    | 4         | 89           | 0,82             | 190          | 140       | 2,2           |
| 4АНК250М8     | 55          | 8    | 3,5       | 89,5         | 0,83             | 185          | 190       | 2,2           |
| 4АНК280S8     | 75          | 8    | 4         | 90,5         | 0,84             | 257          | 190       | 1,9           |
| 4АНК280М8     | 90          | 8    | 4         | 90,5         | 0,84             | 267          | 214       | 1,9           |
| 4АНК315S8     | 110         | 8    | 3,5       | 91,5         | 0,84             | 311          | 225       | 1,9           |
| 4АНК315М8     | 132         | 8    | 3,5       | 92           | 0,84             | 364          | 247       | 1,9           |
| 4АНК355S8     | 160         | 8    | 2,7       | 92,5         | 0,86             | 353          | 285       | 1,7           |
| 4АНК355М8     | 200         | 8    | 2,7       | 92,5         | 0,86             | 359          | 350       | 1,7           |

2. Определить величину начального пускового тока при прямом включении в сеть и величину начального пускового момента трехфазного асинхронного двигателя по следующим данным: номинальная мощность  $P_n = 7,5$  кВт, номинальное фазное напряжение  $U_{1n} = 220$  В, номинальная частота вращения  $n_n = 720$  об/мин,  $\cos \varphi_n = 0,75$ , КПД  $\eta = 86$  %, кратность начального пускового момента  $M_n/M_n = 1,4$ , кратность начального пускового тока  $I_n/I_n = 6$ .

3. С помощью реактора ток в сети при пуске трехфазного асинхронного двигателя ограничен до значения  $I_c = 2I_n$ . Возможен ли пуск двигателя при моменте нагрузки на валу  $M_B = 0,15$  Н·м, если кратность начального пускового момента двигателя  $k_n = 1,2$ , а кратность начального пускового тока  $k_I = 5$ ?

4. Номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя  $P_n = 2000$  кВт,

номинальная частота вращения  $n_n = 1490$  об/мин, кратность начального пускового момента  $k_n = 1,2$ . Напряжение питающей сети  $U_{1c} = 6$  кВ. Обмотка статора соединена в звезду. Определить начальный пусковой момент двигателя при автотрансформаторном пуске со снижением напряжения на зажимах машины до  $U_1 = 4$  кВ.

5. Начальный пусковой ток трехфазного асинхронного двигателя  $I_n = 130$  А при коэффициенте мощности  $\cos \varphi_n = 0,65$ , начальный пусковой момент  $M_n = 450$  Н·м. Напряжение сети  $U_c = 380$  В. Обмотка статора двигателя соединена в звезду. Определить величину активного сопротивления, которое необходимо включить в цепь статора для снижения пускового тока в 2,5 раза. Чему равен при этом начальный пусковой момент двигателя? Какое индуктивное сопротивление обеспечит аналогичные условия пуска?

**Практическая работа №16. Регулирование частоты вращения и особые режимы работы асинхронных машин. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя.**

**Цель занятия.** Изучить решения по регулированию частоты вращения асинхронного двигателя.

**Основы теории:**

Способы регулирования угловой скорости ротора

$$\omega = \omega_1(1 - s) = \frac{2\pi f}{p}(1 - s) \quad (17.1)$$

Регулирование частоты вращения за счет изменения угловой скорости вращения поля:

1) изменением частоты тока; при этом для поддержания  $\Phi = \text{const}$  при изменении частоты необходимо выполнение условий:

$$U_1/f_1 = \text{const при } M_B = \text{const}$$

$$U_1/\sqrt{f_1} = \text{const при } M_B = \text{const}/\omega$$

$$U_1/f^2 = \text{const при } M_B = k\omega^2$$

2) изменением числа пар полюсов.

Регулирование частоты вращения путем изменения скольжения:

1) изменением напряжения;

2) изменением активного сопротивления цепи обмотки фазного ротора; при этом при введении в цепь обмотки ротора дополнительного сопротивления  $r_{\partial}$  критическое скольжение:

$$s_{\text{кр}} = \pm(r_2' + r_{\partial})/\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \quad (17.2)$$

С введенным сопротивлением  $r_{\partial}$  скольжение на механической характеристике двигателя

$$s_1 = s(r_2 + r_{\partial})/r_2 \quad (17.3)$$

где  $s$  – скольжение на естественной механической характеристике ( $r_{\partial}=0$ )

3) введением дополнительной ЭДС в цепь обмотки фазного ротора.

Скольжение после введения дополнительной ЭДС

$$s_1 = s - k_{\partial}' \quad (17.4)$$

где  $k_{\partial}' = \dot{E}_{\partial}/\dot{E}_2 > 0$  если  $\dot{E}_{\partial}$  в фазе с  $\dot{E}_2$ , и  $k_{\partial}' < 0$ , если  $\dot{E}_{\partial}$  в противофазе с  $\dot{E}_2$ .

### Контрольные вопросы и задания

1. Способы регулирования угловой скорости ротора
2. Регулирование частоты вращения за счет изменения угловой скорости вращения
3. Регулирование частоты вращения путем изменения скольжения

### Задачи

1. Напряжение на зажимах трехфазного асинхронного двигателя, частота вращения которого регулируется изменением частоты тока, увеличилось в 1,41 раза. Регулирование частоты вращения осуществляется при условии  $P_2 = \text{const}$ . Определить соответствующее увеличение частоты тока.
2. Определить величину дополнительного сопротивления  $R_{\delta}$  при введении которого в цепь обмотки фазного ротора шестиполусного асинхронного двигателя частота вращения ротора при той же нагрузке снизится от значения  $n = 950$  об/мин до  $n = 600$  об/мин. Сопротивление обмотки ротора  $R_2 = 0,009$  Ом, частота питающей сети  $f_1 = 50$  Гц.
3. Номинальная частота вращения шестиполусного асинхронного двигателя при частоте 50 Гц  $n_H = 950$  об/мин. Активное сопротивление обмотки фазного ротора  $R_2 = 0,1$  Ом. Как изменится частота вращения двигателя, если при неизменной нагрузке ввести добавочное сопротивление  $R_{\delta} = 0,5$  Ом?
4. Введением дополнительного сопротивления в цепь ротора асинхронного двигателя с фазным ротором частота вращения двигателя в номинальном режиме снижена на 25 %. Определить величину дополнительного сопротивления  $R_{\delta}$  и оценить изменение КПД при таком режиме, если номинальная мощность шестиполусного двигателя  $P_H = 160$  кВт, номинальная частота вращения  $n_H = 970$  об/мин, активное сопротивление обмотки ротора  $R_2 = 0,01$  Ом, номинальный КПД  $\eta = 93\%$ . Частота питающей сети  $f_1 = 50$  Гц.
5. При номинальной частоте вращения  $n_H = 950$  об/мин шестиполусного асинхронного двигателя с фазным ротором ЭДС в обмотке ротора  $E_{2s} = 9,2$  В. В этом режиме в цепь обмотки ротора вводится дополнительная ЭДС  $E_{\delta} = 5$  В, находящаяся в фазе с  $E_{2s}$ , и той же частоты. Как изменится при этом частота вращения двигателя? Определить частоту вращения двигателя при введении  $E_{\delta}$ , находящейся в противофазе с  $E_{2s}$ .

**Практическая работа №17. Магнитное поле синхронной машины. Электромагнитные процессы в синхронной машине.**

**Цель занятия.** Расчёт электромагнитных процессов в синхронной машине.

**Основы теории:**

Характерным признаком синхронных машин является жесткая связь между частотой вращения ротора  $n_1$  и частотой переменного тока в обмотке статора  $f_1$ :

$$n_1 = f_1 * 60/p \quad (7.1)$$

В обмотке статора в процессе работы синхронной машины индуцируется ЭДС и протекают токи, которые создают магнитодвижущую силу (МДС), максимальное значение которой

$$F_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} * m_1 * I_d * w_1 * k_{o61}/p \quad (7.2)$$

Эта МДС создает вращающееся магнитное поле, а в воздушном зазоре  $\delta$  машины создается магнитная индукция.

Амплитуда продольной составляющей МДС обмотки якоря

$$F_{dm} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} * m_1 * I_d * w_1 * k_{o61}/p \quad (7.3)$$

Амплитуда поперечной составляющей МДС обмотки якоря

$$F_{qm} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} * m_1 * I_q * w_1 * k_{o61}/p \quad (7.4)$$

Где  $I_d = I |\sin \beta|$  и  $I_q = I |\cos \beta|$  – действующее значение продольной и поперечной систем токов якоря;

$\beta$  – угол между ЭДС возбуждения  $E_f$  и током  $I$  (или МДС  $F_{am}$ ).

Для явнополюсной синхронной машины справедливо уравнение напряжений:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{1d} + \dot{E}_{1q} + \dot{E}_{\sigma 1} - \dot{I}_1 * r_1 \quad (7.5)$$

где:

$\dot{E}_0$  – ЭДС реакции якоря синхронной машины, пропорциональная основному магнитному потоку синхронной машины  $\Phi_0$ ;

$\dot{E}_{1d}$  – ЭДС реакции якоря синхронной машины по продольной оси, пропорциональная МДС реакции якоря по поперечной оси  $F_{1d}$ ;

$\dot{E}_{1q}$  – ЭДС реакции якоря по продольной оси, пропорциональная МДС реакции якоря по поперечной оси  $F_{1q}$ ;

$\dot{E}_{\sigma 1}$  – ЭДС рассеяния, обусловленная наличием магнитного потока рассеяния  $\Phi_{\sigma}$ , величина этой ЭДС пропорциональна индуктивному сопротивлению рассеяния обмотки статора  $x_1$

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j \dot{I}_1 * x_1 \quad (7.6)$$

$I_1 r_1$  – активное падение напряжения в фазной обмотке статора, обычно при решении задач этой величиной пренебрегают ввиду ее небольшого значения.

Для неявнополусной синхронной машины уравнение напряжений имеет вид

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_c - \dot{I}_1 * r_1 \quad (7.7)$$

Здесь

$$\dot{E}_c = \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} \quad (7.8)$$

где  $\dot{E}_1$  – ЭДС реакции якоря неявнополусной синхронной машины.

### Контрольные вопросы и задания

1. Как определить синхронную скорость вращения синхронной машины?
2. Какое поле в синхронной машине называется полем реакции якоря?
3. Какое поле реакции якоря является поперечным, а какое продольным?
4. Напишите уравнение напряжения для явнополусной синхронной машины.
5. Напишите уравнение напряжения для неявнополусной синхронной машины.

### Задачи

1. Определить магнитный поток взаимной индукции, соответствующий току  $I = 1300$  А в трехфазной обмотке двухполусного турбогенератора, его потокосцепление с фазой обмотки статора и индуцируемую в ней ЭДС, если известно: число витков в фазе обмотки  $w_1 = 16$ , число пазов на полюс и фазу  $q = 8$ , шаг обмотки  $y = 20$ , расчетный зазор  $\delta = 3,3$  см, полюсное деление  $\tau = 150$  см, расчетная длина  $l_{\delta} = 210$  см, частота тока 50 Гц.

2. По известным значениям главных индуктивных сопротивлений обмотки якоря по продольной  $X_{ad} = 2,02$  Ом и поперечной  $X_{aq} = 1,53$  Ом осям гидрогенератора определить соответствующую ЭДС взаимной индукции якоря  $E_{ad}$  и  $E_{aq}$  для режима работы, характеризуемого током  $I = 2800$  А и углом  $\beta = 50^\circ$ .

3. Номинальная мощность гидрогенератора  $S_n = 26200$  кВ·А, номинальное линейное напряжение  $U_{нл} = 10,5$  кВ, частота тока  $f = 50$  Гц, соединение фаз – звезда, номинальная частота вращения  $n_n = 125$  об/мин. Найти амплитуду основной гармонической

МДС обмотки якоря, если число витков в фазе  $w_1 = 126$ , обмоточный коэффициент  $k_{об} = 0,94$ . Найти составляющие МДС по продольной и поперечной осям при активно-индуктивной ( $\beta = 50^\circ$ ) нагрузке.



## Практическая работа №18. Параметры синхронных машин. Построение векторных диаграмм синхронного генератора.

**Цель занятия.** Научиться строить векторные диаграммы синхронного генератора

### Теоретическая часть.

Векторная диаграмма ЭДС синхронных генераторов с одной стороны, позволяет на стадии проектирования определять значение  $F(x)$  (а, следовательно, и основные конструктивные данные) для обеспечения необходимого режима работы, с другой – оценить эксплуатационные характеристики уже готовой машины при различной нагрузке, не производя при этом многочисленных опытов.

Два типа задач, о которых говорилось выше, определяют два основных вида векторных диаграмм: различают диаграммы Blondеля и диаграммы Потье.

#### Диаграммы Blondеля

Эти диаграммы используются для анализа характеристик генератора и строятся в следующем порядке. Исходным является уравнение синхронного генератора:

$$\dot{U} = \dot{E} - jx_{ad}\dot{I}_d - j\dot{I}_q x_{aq} - jx_{sa}\dot{I} - \dot{I} * r_a \quad (8.1)$$

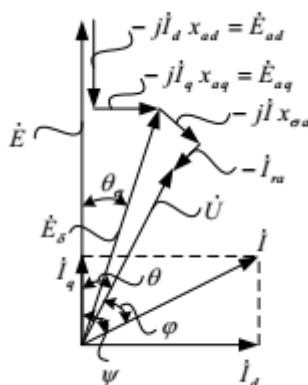


Рисунок 8.1 – Векторная диаграмма Blondеля с учетом сопротивлений реакции якоря (для R-L нагрузки)

Это 1-й вид векторных диаграмм строится в указанном ниже порядке:

$$\dot{E} \rightarrow \dot{I} \rightarrow \dot{E}_{ad} \rightarrow \dot{E}_{aq} \rightarrow \dot{E}_s \rightarrow \dot{E}_{sa} \rightarrow \dot{I}_{ra} \rightarrow \dot{U}$$

Угол между векторами  $\dot{E}$  и  $\dot{U}$  называется углом нагрузки. В генераторном режиме работы вектор  $\dot{E}$  всегда опережает  $\dot{U}$  и считается положительным. Название  $\theta$  идёт оттого, что он зависит от нагрузки (активной мощности) синхронного генератора.

$$P = m\dot{U}\dot{I} \cos \varphi \quad (8.2)$$

Из диаграммы можно проследить, что, если,  $\dot{U}, \dot{I} = const$ , а  $\varphi$  – меняется, то меняется

$$\dot{I}_q \Rightarrow \dot{E}_{aq}, \alpha \Rightarrow u \theta.$$

2-й вид диаграммы Blondеля основан на уравнении, записанном через синхронные сопротивления:

$$\dot{U} = \dot{E} - j\dot{I}_d x_d - j\dot{I}_q x_q - \dot{I} r_a \quad (8.3)$$

и строится в том же порядке, как и предыдущая.

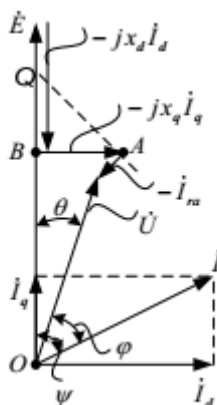


Рисунок 8.2 – Векторная диаграмма Blondеля с учетом синхронных индуктивных сопротивлений

Если в векторах падений напряжений поменять знаки, то получим векторные диаграммы, соответствующие уравнению:

$$\dot{E} = \dot{U} + j\dot{I}_d x_d + j\dot{I}_q x_q + \dot{I} r_a \quad (8.4)$$

Прямая, проведенная из точки А перпендикулярно вектору  $\dot{I}$  до пересечения вектора  $\dot{E}$  (или его продолжения) в точке Q будет отсекать отрезок  $AQ = x_q I$ .

Угол  $QAB = \psi$  (так как имеет стороны перпендикулярные сторонам угла  $\psi$ ) значит

$$AQ = \frac{AB}{\cos \psi} = \frac{\dot{I}_q x_q}{\cos \psi} = \dot{I} x_q \quad (8.5)$$

Это свойство используется в диаграммах Потье, где по  $\dot{I}, \dot{U} \cos \varphi$  и находят  $\dot{E}$ .

Для неявнополюсных машин  $x_d = x_q$ , поэтому нет необходимости разлагать ток на составляющие, и векторная диаграмма выглядят значительно проще.

Рассмотренные векторные диаграммы справедливы для любого установившегося режима работы синхронного генератора с постоянной степенью

насыщения, т. е. с постоянными  $x_{ad}$  и  $x_{aq}$ .

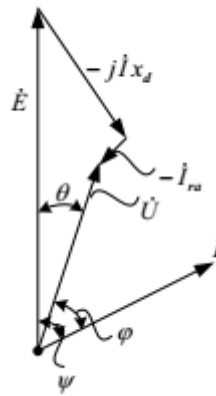


Рисунок 8.3 – Векторная диаграмма неявнополюсного СГ

#### Диаграмма Потье (неявнополюсный синхронный генератор)

Как уже говорилось, такой тип диаграмм используется при проектировании и эксплуатации синхронных машин, когда надо определить  $i_f$ , необходимый для обеспечения заданных  $\dot{U}$ ,  $\dot{I}$ ,  $\cos \varphi$ , с учетом насыщения.

Сначала строят  $\dot{U}$  и  $\dot{I}$ , затем  $j\dot{I}x_{sa}$  и  $\dot{I}r_a$ , находят  $\dot{E}_\delta$ , необходимую затем для создания режима.

Затем по характеристике холостого хода определяют  $i_\mu$  необходимую для создания  $\dot{E}_\delta$ . Затем вычитая из  $\dot{F}_{va}$  н.с. р. я., приведённую к  $i_\chi \dot{F}'_a$ , получим полную н.с. ОВ.

Диаграмма Потье таким образом состоит из двух: векторная диаграмма ЭДС. Как определить по диаграмме Потье напряжение на зажимах генератора при сбросе нагрузки? и векторная диаграмма намагниченных сил.

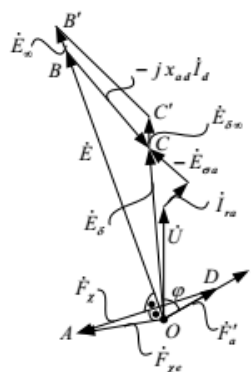


Рисунок 8.4 – Векторная диаграмма ЭДС Потье

При практическом использовании диаграммы Потье, её совмещают с характеристикой холостого хода.

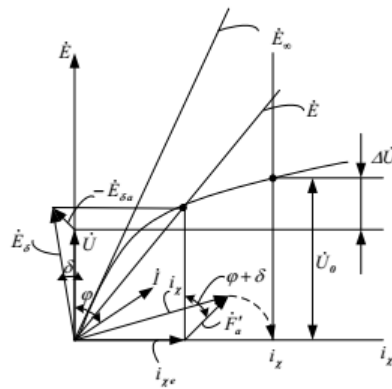


Рисунок 8.5 – Векторная диаграмма намагничивающих сил Потье

При построении принимается  $r_a \approx 0$ . Более точные результаты диаграмма даёт, если вместо  $\dot{E}_s$  диаграмма построена для неявнополюсных машин.

Вектор  $\dot{E}_s$  должен быть перпендикулярен  $AD$  (н. с.  $\dot{F}_x$ ). Если из точки  $C$  провести прямую перпендикулярную  $\dot{i}$ , то пересечения её и  $OB$  даст насыщенное  $\dot{E}$ , если вместо  $\dot{E}_s$  отложить  $\dot{E}_{s\infty}$ , то аналогичным способом получим  $\dot{E}_{\infty}$ .

По совмещенной диаграмме Потье и характеристики холостого хода можно получить значение напряжения на зажимах при сбросе  $\dot{U}_0$  ( $i_x = \text{const}$ ) нагрузки и найти изменения напряжения  $\Delta \dot{U}$ . Разница между  $\dot{U}_0$  и  $\dot{E}$  при этом имеет место от того, что для режима нагрузки и холостого хода принимается (при определении  $\dot{E}$ ) одна степень насыщения, а на самом деле они различны.

### Контрольные вопросы и задания

1. Что определяю с помощью векторных диаграмм синхронного генератора?
2. Каков порядок построение диаграммы Blondеля?
3. Как выглядит диаграмма Blondеля для неявнополюсного генератора?
4. Порядок построения диаграммы Потье для явнополюсного генератора.

### Задачи

1. Построить векторную диаграмму для явнополюсного синхронного генератора, имеющего активно-емкостную нагрузку.
2. Построить векторную диаграмму для явнополюсного синхронного генератора, имеющего активную нагрузку.
3. Построить векторную диаграмму для неявнополюсного синхронного генератора, имеющего активно-емкостную нагрузку.
4. Построить векторную диаграмму для неявнополюсного синхронного генератора, имеющего активную нагрузку.

## **5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

#### **5.1.2 Перечень основной литературы:**

1. Игнатович В.М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2013. — 182 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34738.html>
2. Дробов А.В. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Дробов, В.Н. Галушко. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2015. — 292 с. — 978-985-503-540-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67795.html>

#### **5.1.3 Перечень дополнительной литературы:**

1. Электрические машины [Электронный ресурс] : сборник задач / В. И. Парамонова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московская государственная академия водного транспорта, 2015. — 72 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46905.html>

### **5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

1. Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Электрические машины».
2. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электрические машины».
3. Методические указания по организации и проведению самостоятельной работы по дисциплине «Электрические машины».

### **5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины**

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

## **Методические указания**

по организации самостоятельной работы студентов  
по дисциплине «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ»  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

## Содержание

### Введение

- 1    Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины «Электрические машины»
- 2    План-график выполнения самостоятельной работы
- 3    Контрольные точки и виды отчетности по ним
- 4    Методические рекомендации по изучению теоретического материала
- 5    Методические указания по подготовке к экзамену.
- 6    Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

## **Введение**

Самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Целью самостоятельной работы студентов является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности. Самостоятельная работа студентов способствует развитию самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровня.



## **Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины «Электрические машины»**

Самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента. Самостоятельная работа студентов играет значительную роль в рейтинговой технологии обучения. В связи с этим, обучение в ВУЗе включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и процесса самообучения. Поэтому СРС должна стать эффективной и целенаправленной работой студента.

К современному специалисту общество предъявляет достаточно широкий перечень требований, среди которых немаловажное значение имеет наличие у выпускников определенных способностей и умения самостоятельно добывать знания из различных источников, систематизировать полученную информацию, давать оценку конкретной финансовой ситуации. Формирование такого умения происходит в течение всего периода обучения через участие студентов в практических занятиях, выполнение контрольных заданий и тестов, написание курсовых и выпускных квалификационных работ. При этом самостоятельная работа студентов играет решающую роль в ходе всего учебного процесса.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой специалиста и бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Формы самостоятельной работы студентов разнообразны. В соответствии с рабочей программой дисциплины предусмотрены следующие виды самостоятельной работы студента:

- самостоятельное изучение литературы;
- самостоятельное решение задач;
- выполнение курсового проекта.

**Цель самостоятельного изучения литературы** – самостоятельное овладение знаниями, опытом исследовательской деятельности.

**Задачами** самостоятельного изучения литературы являются:

- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов.

**Цель самостоятельного решения задач** - овладение профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю будущей деятельности.

**Задачами** самостоятельного решения задач являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений.

**Целью самостоятельного выполнения расчетно-графической работы** по дисциплине является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности.

**Задачами** данного вида самостоятельной работы студента являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений;
- использование материала, собранного и полученного в ходе самостоятельных занятий на семинарах, на практических и лабораторных занятиях, при написании курсовой работы.

В результате освоения дисциплины формируются следующий перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы:

| Код, формулировка компетенции                                                                  | Код, формулировка индикатора                                                                                                                              | Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ОПК-4 Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических | ИД-5 <sub>ОПК-4</sub> Анализирует установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин, использует знание их режимов работы и характеристик | <p>Знает принцип действия современных типов электрических машин, особенности их конструкции и уравнения</p> <p>Умеет анализировать установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин.</p> <p>Владеет навыками моделирования электрических цепей</p> |

### План-график выполнения самостоятельной работы

| Коды реализуемых компетенций, индикатора(ов) | Вид деятельности студентов                          | Средства и технологии оценки                             | Объем часов, в том числе |                                    |       |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|-------|
|                                              |                                                     |                                                          | СРС                      | Контактная работа с преподавателем | Всего |
| Очная форма обучения                         |                                                     |                                                          |                          |                                    |       |
| 4 семестр                                    |                                                     |                                                          |                          |                                    |       |
| ОПК-4<br>ИД-5 <sub>ОПК-4</sub>               | Самостоятельное изучение литературы по темам №1-18  | Собеседование                                            | 21,06                    | 2,34                               | 23,4  |
|                                              | Подготовка к лекциям                                | Собеседование                                            | 3,24                     | 0,36                               | 3,6   |
|                                              | Подготовка к практическим занятиям                  | Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач | 3,24                     | 0,36                               | 3,6   |
|                                              | Подготовка к лабораторным занятиям                  | Собеседование                                            | 4,86                     | 0,54                               | 5,4   |
| Итого за 4семестр:                           |                                                     |                                                          | 32,4                     | 3,6                                | 36    |
| 5 семестр                                    |                                                     |                                                          |                          |                                    |       |
| ОПК-4<br>ИД-5 <sub>ОПК-4</sub>               | Самостоятельное изучение литературы по темам №19-27 | Собеседование                                            | 34,02                    | 3,78                               | 37,8  |
|                                              | Подготовка к лекциям                                | Собеседование                                            | 3,24                     | 0,36                               | 3,6   |
|                                              | Подготовка к практическим занятиям                  | Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач | 6,48                     | 0,72                               | 7,2   |
|                                              | Подготовка к лабораторным занятиям                  | Собеседование                                            | 4,86                     | 0,54                               | 5,4   |
| Итого за 5 семестр:                          |                                                     |                                                          | 48,6                     | 5,4                                | 54    |
| Итого:                                       |                                                     |                                                          | 81                       | 9                                  | 90    |
| Заочная форма обучения                       |                                                     |                                                          |                          |                                    |       |

| 4 семестр                      |                                                     |                                                          |       |      |       |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------|------|-------|
| ОПК-4<br>ИД-5 <sub>ОПК-4</sub> | Самостоятельное изучение литературы по темам №1-18  | Собеседование                                            | 108   | 12,6 | 120,6 |
|                                | Подготовка к лекциям                                | Собеседование                                            | 0,36  | 0,04 | 0,4   |
|                                | Подготовка к практическим занятиям                  | Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач | 0,72  | 0,08 | 0,8   |
|                                | Подготовка к лабораторным занятиям                  | Собеседование                                            | 1,08  | 0,12 | 1,2   |
| Итого за 4 семестр:            |                                                     |                                                          | 110,7 | 12,3 | 123   |
| 5 семестр                      |                                                     |                                                          |       |      |       |
| ОПК-4<br>ИД-5 <sub>ОПК-4</sub> | Самостоятельное изучение литературы по темам №19-27 | Собеседование                                            | 144,9 | 16,1 | 161   |
|                                | Подготовка к лекциям                                | Собеседование                                            | 0,54  | 0,06 | 0,6   |
|                                | Подготовка к практическим занятиям                  | Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач | 1,08  | 0,12 | 1,2   |
|                                | Подготовка к лабораторным занятиям                  | Собеседование                                            | 1,08  | 0,12 | 1,2   |
| Итого за 5 семестр:            |                                                     |                                                          | 147,6 | 16,4 | 164   |
| Итого:                         |                                                     |                                                          | 258,3 | 28,7 | 287   |

### Контрольные точки и виды отчетности по ним

| № п/п            | Вид деятельности студентов | Сроки выполнения | Количество баллов |
|------------------|----------------------------|------------------|-------------------|
| <b>4 семестр</b> |                            |                  |                   |
| 1.               | Практическое занятие № 3   | 6 неделя         | 25                |
| 2.               | Лабораторное занятие № 4   | 10 неделя        | 15                |
| 3.               | Практическое занятие № 7   | 16 неделя        | 15                |
|                  | <b>Итого за 4 семестр</b>  |                  | <b>55</b>         |
|                  | <b>Итого</b>               |                  | <b>55</b>         |
| <b>5 семестр</b> |                            |                  |                   |
| 4.               | Лабораторное занятие № 12  | 6 неделя         | 25                |
| 5.               | Практическое занятие № 9   | 10 неделя        | 15                |
| 6.               | Лабораторное занятие № 17  | 16 неделя        | 15                |
|                  | <b>Итого за 5 семестр</b>  |                  | <b>55</b>         |
|                  | <b>Итого</b>               |                  | <b>55</b>         |

Максимально возможный балл за весь текущий контроль Максимально возможный балл за весь текущий контроль устанавливается равным 55. Текущее контрольное мероприятие считается сданным, если студент получил за него не менее 60% от установленного для этого контроля максимального балла. Рейтинговый балл, выставаемый студенту за текущее контрольное мероприятие, сданное студентом в установленные графиком контрольных мероприятий сроки, определяется следующим образом:

| Уровень выполнения контрольного задания | Рейтинговый балл (в % от максимального балла за контрольное задание) |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Отличный                                | <b>100</b>                                                           |
| Хороший                                 | <b>80</b>                                                            |
| Удовлетворительный                      | <b>60</b>                                                            |
| Неудовлетворительный                    | <b>0</b>                                                             |

Рейтинговая система успеваемости студентов не предусмотрена для заочной формы обучения.

## **Методические рекомендации по изучению теоретического материала**

Самостоятельная работа студента начинается с внимательного ознакомления с содержанием учебного курса.

Изучение каждой темы следует начинать с внимательного ознакомления с набором вопросов. Они ориентируют студента, показывают, что он должен знать по данной теме. Вопросы темы как бы накладываются на соответствующую главу избранного учебника или учебного пособия. В итоге должно быть ясным, какие вопросы темы учебного курса и с какой глубиной раскрыты в конкретном учебном материале, а какие вообще опущены. Требуется творческое отношение и к самому содержанию дисциплины.

Вопросы, составляющие ее содержание, обладают разной степенью важности. Есть вопросы, выполняющие функцию логической связки содержания темы и всего курса, имеются вопросы описательного или разъяснительного характера, а также исторического экскурса в область изучаемой дисциплины. Все эти вопросы не составляют сути понятийного, концептуального содержания темы, но необходимы для целостного восприятия изучаемых проблем.

Изучаемая дисциплина имеет свой категориально-понятийный аппарат. Научные понятия — это та база, на которой строится каждая наука. Понятия — узловые, опорные пункты как научного, так и учебного познания, логические ступени движения в учебе от простого к сложному, от явления к сущности. Без ясного понимания понятий учеба крайне затрудняется, а содержание приобретенных знаний становится тусклым, расплывчатым.

Студент должен понимать, что самостоятельное овладение знаниями является главным, определяющим. Высшая школа создает для этого необходимые условия, помогает будущему высококвалифицированному специалисту овладеть технологией самостоятельного производства знаний.

В самостоятельной работе студентам приходится использовать литературу различных видов: первоисточники, монографии, научные сборники, хрестоматии, учебники, учебные пособия, журналы и др. Изучение курса предполагает знакомство студентов с большим объемом научной и учебной литературы, что, в свою очередь, порождает необходимость выработки у них рационально-критического подхода к изучаемым источникам.

Чтобы не «утонуть» в огромном объеме рекомендованных ему для изучения источников, студент, прежде всего, должен научиться правильно их читать. Правильное чтение рекомендованных источников предполагает следование нескольким несложным, но весьма полезным правилам.

Предварительный просмотр книги включает ознакомление с титульным листом книги, аннотацией, предисловием, оглавлением. При ознакомлении с оглавлением необходимо выделить разделы, главы, параграфы, представляющие для вас интерес, бегло их просмотреть, найти места, относящиеся к теме (абзацы, страницы, параграфы), и познакомиться с ними в общих чертах.

Научные издания сопровождаются различными вспомогательными материалами — научным аппаратом, поэтому важно знать, из каких основных элементов он состоит, каковы его функции.

Знакомство с книгой лучше всего начинать с изучения аннотации — краткой характеристики книги, раскрывающей ее содержание, идейную, тематическую и жанровую направленность, сведения об авторе, назначение и другие особенности. Аннотация помогает составить предварительное мнение о книге.

Глубже понять содержание книги позволяют вступительная статья, в которой дается оценка содержания книги, затрагиваемой в ней проблематики, содержится информация о жизненной и творческой биографии автора, высказываются полемические замечания, разъясняются отдельные положения книги, даются комментарии и т.д. Вот почему знакомство с вступительной статьей представляется очень важным: оно помогает студенту сориентироваться в тексте работы, обратить внимание на ее наиболее ценные и важные разделы.

Той же цели содействует знакомство с оглавлением, предисловием, послесловием. Весьма полезными элементами научного аппарата являются сноски, комментарии, таблицы, графики, списки литературы. Они не только иллюстрируют отдельные положения книги или статьи, но и сами по себе являются дополнительным источником информации для читателя.

Если читателя заинтересовала какая-то высказанная автором мысль, не нашедшая подробного освещения в данном источнике, он может обратиться к тексту источника, упоминаемого в сноске, либо к источнику, который он может найти в списке литературы, рекомендованной автором для самостоятельного изучения.

Существует несколько форм ведения записей:

— план (простой и развернутый) — наиболее краткая форма записи прочитанного, представляющая собой перечень вопросов, рассматриваемых в книге или статье. Развернутый план представляет собой более подробную запись прочитанного, с детализацией отдельных положений и выводов, с выпиской цитат, статистических данных и т.д. Развернутый план — неоценимый помощник при выступлении с докладом на конкретную тему на семинаре, конференции;



— тезисы — кратко сформулированные положения, основные положения книги, статьи. Как правило, тезисы составляются после предварительного знакомства с текстом источника, при его повторном прочтении. Они помогают запомнить и систематизировать информацию.

#### Составление конспектов

Большую роль в усвоении и повторении пройденного материала играет хороший конспект, содержащий основные идеи прочитанного в учебнике и услышанного в лекции. Конспект — это, по существу, набросок, развернутый план связного рассказа по основным вопросам темы.

В какой-то мере конспект рассчитан (в зависимости от индивидуальных особенностей студента) не только на интеллектуальную и эмоциональную, но и на зрительную память, причем текст конспекта нередко ассоциируется еще и с текстом учебника или записью лекции. Поэтому легче запоминается содержание конспектов, написанных разборчиво, с подчеркиванием или выделением разрядкой ключевых слов и фраз.

Самостоятельно изученные темы предоставляются преподавателю в форме конспекта, по которому происходит собеседование. Теоретические темы курса (отдельные вопросы), выносимые на самостоятельное изучение, представлены ниже.

Типовые контрольные задания и иные материалы, характеризующие этапы формирования компетенций

#### Вопросы для собеседования

1. Поясните устройство трансформатора, назначение катушек и магнитопровода.
2. Объясните принцип действия трансформатора.
3. Почему в первичной обмотке, подключенной к сети, возникает э.д.с  $E_1$ ? В каком соотношении находится э.д.с  $E_1$  с напряжением сети  $U_1$ ?
4. Что такое коэффициент трансформации  $k_{тр}$  и какие варианты расчета его существуют?
5. Как создается суммарный магнитный поток  $\Phi_{\Sigma}$ ?
6. Объясните принцип постоянства суммарного магнитного потока  $\Phi_{\Sigma}$ .
7. Что такое коэффициент трансформации токов?
8. Объясните принцип постоянства полной мощности трансформатора.
9. Назовите условия проведения опыта холостого хода и определяемые по результатам опыта параметры схемы замещения трансформатора.
10. Поясните вид схемы замещения трансформатора и смысл измеренных сигналов в опыте холостого хода.

11. Назовите условия проведения опыта короткого замыкания и определяемые по результатам опыта параметры схемы замещения трансформатора.
12. Поясните вид схемы замещения трансформатора и смысл измеренных сигналов в опыте короткого замыкания.
13. Составьте уравнения, описывающие нагруженный трансформатор.
14. Поясните вычисления и построения, позволяющие найти вектор.
15. Что такое "внешняя характеристика трансформатора" и чем определяется выбор метода ее расчета?
16. Приведите вывод формулы внешней характеристики трансформатора.
17. От чего зависит наклон внешней характеристики трансформатора?
18. Поясните смысл мощностей, отраженных на энергетической диаграмме.
19. Какие мощности зависят и не зависят от коэффициента загрузки  $\beta$ ?
20. При какой загрузке  $\beta$  к.п.д. трансформатора максимально?
21. Поясните возможные конструкции систем трансформации трехфазных напряжений.
22. Какие схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора существуют и где применяются соответствующие трансформаторы?
23. Поясните схему трехфазного трансформатора с группой 0.
24. Поясните схему трехфазного трансформатора с группой 11.
25. Почему для трехфазного трансформатора невозможно составить схемы замещения обмоток по процедурам, которые использовались при составлении схемы замещения однофазного трансформатора?
26. Какие схемы замещения используются для трехфазного трансформатора, работающего на симметричную нагрузку и как выполняется расчет?
27. Какие схемы замещения используются для трехфазного трансформатора, работающего на несимметричную нагрузку и как выполняется расчет?
28. Почему при синусоидальном токе в обмотке трансформатора магнитный поток, э.д.с. и напряжение обмотки несинусоидальное?
29. Почему при синусоидальном магнитном потоке в магнитопроводе трансформатора э.д.с., напряжение обмотки будут синусоидальными, а ток - несинусоидальным?
30. Обоснуйте синусоидальную форму вторичного напряжения трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток
31. Обоснуйте несинусоидальную форму вторичного напряжения трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y.

32. Обоснуйте синусоидальную форму вторичного напряжения трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток  $Y/\Delta$ .
33. Как выглядит схема замещения трансформатора в режиме к.з.?
34. Как рассчитывают принужденную  $i_{пр}$  и свободную  $i_{св}$  составляющие тока к.з.?
35. Каковы оценки значения установившегося тока к.з. и чем он опасен для трансформатора?
36. Каковы оценки значения ударного тока к.з. и чем он опасен для трансформатора и защитной аппаратуры?
37. Обоснуйте вид схемы замещения трансформатора при его включении, составьте по схеме дифференциальное уравнение и обоснуйте правомерность использования в расчетах ненасыщенного значения индуктивности  $L_0$ .
38. Как выглядят графики магнитного потока и тока трансформатора при его включении?
39. Почему мощные силовые трансформаторы должны быть предусмотрены меры от отключения защитой при его вводе в работу?
40. Поясните устройство и принцип действия автотрансформатора.
41. Как отличаются у трансформатора и автотрансформатора числа витков, токи в одноименных обмотках, габаритные мощности и к.п.д.?
42. Назовите преимущества и недостатки автотрансформатора
43. Какими должны быть параметры сварочного трансформатора и какова должна быть внешняя характеристика?
44. Поясните устройство и принцип действия сварочного трансформатора с регулировочным дросселем и магнитным шунтом.
45. В каких случаях применяют измерительные трансформаторы напряжения и тока?
46. Поясните схему включения трансформатора напряжения. Какие погрешности существуют и как их минимизировать?
47. Поясните схему включения трансформатора тока. Какие погрешности существуют и как их минимизировать?
48. Почему нельзя оставлять трансформатор тока с разомкнутой вторичной обмоткой?
49. Какие электромагнитные явления наблюдаются в электрических машинах?
50. Как привести явление электромагнитной индукции к правилу правой руки?
51. Поясните устройство и назначение отдельных элементов ДПТ.

52. Каков принцип действия ДПТ?
53. Какой побочный эффект возникает во вращающемся ДПТ?
54. Поясните вывод уравнения электрического состояния якорной цепи ДПТ.
55. Поясните принцип действия ГПТ и вид уравнения электрического состояния его якорной цепи.
56. Какой побочный эффект возникает в нагруженном ГПТ?
57. Поясните физику преобразования энергии сторонних механизмов, вращающих якорь ГПТ, в энергию электрическую.
58. Что называется реакцией якоря у МПТ?
59. К каким отрицательным последствиям приводит реакция якоря у ДПТ?
60. К каким отрицательным последствиям приводит реакция якоря у ГПТ?
61. Поясните принцип компенсации реакции якоря с помощью дополнительных полюсов.
62. Какие требования к обмотке якоря и к установке щеток должны быть выполнены, чтобы можно было снять с обмотки якоря ГПТ во внешнюю цепь максимальное напряжение?
63. Какие требования к обмотке якоря и к установке щеток должны быть выполнены, чтобы можно было снять с обмотки якоря ГПТ во внешнюю цепь максимальное напряжение?
64. Какие условия учитываются при укладке секций обмотки якоря в пазы и определении места установки щеток?
65. Обоснуйте принцип выбора места установки щеток в ГПТ.
66. Как направлены э.д.с. в активных секциях якорной обмотки ГПТ?
67. Обоснуйте принцип суммирования секционных э.д.с. в общую э.д.с.  $E$  ГПТ и принцип согласованности направлений э.д.с., образуемых в параллельных ветвях между щетками.
68. Как направлены токи во всех секциях якорной обмотки ДПТ?
69. Обоснуйте принцип суммирования механических сил, действующих на стороны активных секций в ДПТ.
70. Как направлены э.д.с. в активных секциях якорной обмотки ГПТ и почему напряжение между коллекторными пластинами выше, чем у ГПТ с петлевой обмоткой?
71. Обоснуйте принцип выбора места установки щеток в ГПТ.
72. Как направлены токи во всех секциях якорной обмотки ДПТ?
73. Обоснуйте принцип суммирования механических сил, действующих на стороны активных секций в ДПТ.

74. Поясните электромагнитные причины искрения щеток.
75. Поясните смысл э.д.с.  $e_I$  и  $e_B$ .
76. Составьте уравнение коммутации и найдите его решения для случая идеальной прямолинейной коммутации.
77. Что представляет собой замедленная и ускоренная коммутация и почему при этих коммутациях возникает искрение щеток?
78. Какие существуют методы устранения причин механического и электромагнитного искрения щеток?
79. Составьте уравнения цепи обмотки возбуждения и якоря.
80. Выведите выражения  $\mathcal{E}_M$  и  $M$  ДПТ.
81. Какие характеристики ДПТ называются естественными, а какие искусственными?
82. Как влияют дополнительные сопротивления  $R_{дЯ}$  и  $R_{дВ}$  на наклон и частоту холостого хода  $\mathcal{E}_M$  и  $M$ ?
83. Приведите выражения  $\mathcal{E}_M$  и  $M$  в общем виде.
84. Приведите выражения  $\mathcal{E}_M$  и  $M$  для линейного участка кривой намагничивания стали магнитопровода.
85. Приведите выражения  $\mathcal{E}_M$  и  $M$  для насыщенного участка кривой намагничивания стали магнитопровода.
86. Какие недостатки и достоинства имеют серийные ДПТ?
87. Какие способы включения шунтовой и серийной обмоток применяют в компаундном ДПТ?
88. Поясните особенности  $M$  компаундного ДПТ с параллельно-последовательным возбуждением.
89. Поясните особенности  $M$  компаундного ДПТ с последовательно-параллельным возбуждением.
90. Какие существуют способы пуска ДПТ и каковы критерии качества процесса пуска?
91. Поясните способ прямого пуска ДПТ. В чем его недостатки?
92. Поясните способ реостатного пуска ДПТ. В чем его достоинства и недостатки?
93. Поясните способ пуска ДПТ с регулируемым якорным напряжением. В чем его достоинства и недостатки?
94. Какие существуют способы частоты вращения ДПТ и каковы критерии качества процесса регулирования?

95. Поясните способ реостатного регулирования частоты вращения ДПТ. В чем его достоинства и недостатки?
96. Поясните способ якорного регулирования частоты вращения ДПТ. В чем его достоинства и недостатки?
97. Поясните способ полевого регулирования частоты вращения ДПТ. В чем его достоинства и недостатки?
98. Какие существуют способы частоты вращения ДПТ и каковы критерии качества процесса торможения?
99. Поясните способ торможения ДПТ противовключением и какие имеет характеристики эффективности?
100. Поясните способ динамического торможения ДПТ и какие имеет характеристики эффективности?
101. Поясните способ рекуперативного торможения ДПТ и какие имеет характеристики эффективности?
102. Как классифицируется ГПТ в зависимости от способа возбуждения?
103. Пояснить внешний вид характеристики холостого хода.
104. Пояснить внешний вид внешней характеристики.
105. Пояснить внешний вид регулировочной характеристики.
106. Поясните процесс самовозбуждения ГПТ с параллельным возбуждением.
107. Поясните вид внешней характеристики ГПТ с параллельным возбуждением.
108. Почему для ГПТ с параллельным возбуждением не опасен режим короткого замыкания.
109. Поясните вид внешней характеристики ГПТ с последовательным возбуждением.
110. В каких установках применяют компаундные ГПТ с разными схемами включения шунтовой и серийной обмоток возбуждения?
111. Назовите условия введения ГПТ для работы параллельно с сетью бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности.
112. Назовите условия нагружения ГПТ, работающего на сеть бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности.
113. Как регулируется возбуждение параллельно работающих ГПТ, работающих на сеть бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности?
114. Какими уравнениями описывается процесс короткого замыкания в ГПТ с независимым и параллельным возбуждением?

115. Как рассчитать ток короткого замыкания для ГПТ с независимым возбуждением?
116. Как рассчитать ток короткого замыкания для ГПТ с параллельным возбуждением?
117. Какие виды потерь существуют в машинах постоянного тока?
118. Составьте энергетическую диаграмму и формулу к.п.д.
119. При какой нагрузке по току к.п.д. машины постоянного тока максимальный?
120. Поясните устройство и принцип действия универсального коллекторного двигателя.
121. Как рассчитать ЭМХ и МХ двигателя на переменном токе?
122. Какие недостатки и достоинства у коллекторного двигателя?
123. Поясните устройство и принцип действия ТГ постоянного тока.
124. Как существуют погрешности выходной характеристики и каковы меры по уменьшению этих погрешностей?
125. Какие достоинства и недостатки у ТГ постоянного тока?
126. Поясните принцип действия ЭМУ и за счет чего в ЭМУ получается усиление по мощности?
127. Поясните вид базовой внешней характеристики ТГ и характеристики с учетом погрешностей. Какие погрешности существуют?
128. Поясните устройство АД.
129. Поясните принцип действия АД.
130. Почему двигатель называется асинхронным?
131. Перечислите условия получения вращающегося магнитного поля статора.
132. Приведите вывод суммарного магнитного поля статора в функции линейной координаты круга статора и времени.
133. Докажите поведение суммарного поля статора как бегущей вдоль круга статора волны.
134. Как влияет на частоту вращения магнитного поля статора число пар полюсов его обмоток?
135. Поясните схемы укладки в пазы однослойной простой и распределенной обмоток статора АД.
136. Поясните схемы укладки в пазы концентрической и шаблонной обмоток. Назовите их достоинства и недостатки.
137. Какие преимущества имеет двухслойная обмотка статора с укороченным шагом?

138. Приведите расчет-обоснование размеров секций, полюсной катушки и правила укладки ее в пазы статора.
139. Поясните схему укладки в пазы секций полюсной катушки в два слоя.
140. Поясните вычисления интенсивности полей контуров полюсных катушек и вычисления полного поля катушки.
141. Как соединяются между собой полюсные катушки статора?
142. Поясните причину индуцирования э.д.с. в обмотках статора и ротора.
143. Каковы уравнения заторможенного АД при разомкнутом и замкнутом роторе?
144. Поясните устройство и принцип действия индукционного регулятора трехфазного напряжения.
145. Какие виды механических и электрических частот вращения используются в теории АД и как они между собой связаны?
146. Поясните энергетическую диаграмму АД и как из нее найти к.п.д.?
147. Как из энергетической диаграммы найти вращающий момент АД?
148. В чем состоят отличия в приведении трансформатор и АД?
149. Поясните процедуру приведения ротора к статору по частоте.
150. Поясните процедуру приведения ротора к статору по э.д.с. и вид полной схемы замещения АД.
151. Поясните, как по полной схеме замещения АД рассчитать механическую мощность на валу АД?
152. Поясните приведение полной схемы замещения АД к упрощенной.
153. Дайте формулировки электромеханической и механической характеристик АД.
154. Приведите расчет ЭМХ по упрощенной схеме замещения АД.
155. Приведите расчет МХ по упрощенной схеме замещения АД.
156. Какие особые точки имеются на графиках ЭМХ и МХ и каковы их числовые значения?
157. Приведите выражения упрощенной и полной формулы Клосса.
158. Как рассчитать критическое скольжение и момент через параметры обмоток АД?
159. Как рассчитать критический момент через каталожные данные АД?
160. Как с помощью уравнения механики вращательного движения можно судить об устойчивости работы нагруженного АД?
161. Как доказать устойчивость работы "в малом" на рабочем участке МХ АД?



162. Как доказать неустойчивость работы "в малом" на разгонном участке МХ АД?
163. Что такое устойчивость работы АД "в большом"?
164. Поясните устройство и особенности работы АД с двухклеточным ротором.
165. Поясните процессы вытеснения тока в двухклеточном АД от пуска до выхода на рабочую характеристику установившегося режима.
166. Поясните устройство и принцип действия глубокопазного АД.
167. Почему у обмоток двухклеточного АД разные критические скольжения?
168. Почему у двухклеточного АД повышенный пусковой момент?
169. Почему на МХ АД существует провал момента и опасен ли он?
170. Почему формула Клосса слишком неточная и в каких случаях ее применение допустимо?
171. Как рассчитать сопротивления статора и входные сопротивления АД?
172. Как рассчитать входные проводимости двухклеточного ротора АД?
173. Составьте уравнения проводимостей цепи ротора, выраженное через сопротивления клеток для номинального и пускового режима.
174. Как рассчитать ЭМХ и МХ двухклеточного АД?
175. Какими показателями оценивается оптимальность способа пуска АД?
176. Поясните способ прямого пуска АД.
177. Поясните способ реакторного пуска АД.
178. Поясните способ автотрансформаторного пуска АД.
179. Поясните способ пуска АД путем переключения схемы соединения его статорных обмоток.
180. Поясните способ частотного пуска АД.
181. Какие законы регулирования скорости АД реализуются при частотном управлении?
182. Поясните способ регулирования частоты АД изменением напряжением питания.
183. Поясните способ регулирования частоты АД изменением частоты напряжения питания.
184. Поясните способ регулирования частоты АД одновременным изменением уровня напряжения питания и его частоты.
185. В каких случаях целесообразно применять линейный закон частотного управления АД, а в каких – параболический?
186. Как устроен АД с фазным ротором и какова область его применения?

187. Как изменяются параметры МХ и ЭМХ при включении в цепь ротора дополнительных сопротивлений?
188. Поясните режим разгона АД с фазным ротором.
189. Поясните способ регулирования частоты вращения АД с помощью добавочных сопротивлений в цепи ротора.
190. Поясните принцип изменения числа пар полюсов в полюсопереключаемом АД.
191. Покажите, что при изменении числа пар полюсов обмотки статора искажаются графики магнитных потоков фазных обмоток.
192. Почему о полюсопереключаемых АД понижается вращающий момент?
193. Почему о полюсопереключаемых АД понижается к.п.д.?
194. Поясните схему и МХ режима торможения АД противовключением.
195. Поясните схему и МХ режима динамического торможения АД.
196. Поясните схему и МХ режима рекуперативного торможения АД при спуске груза.
197. Поясните схему и МХ режима рекуперативного торможения АД при понижении частоты питающего напряжения.
198. Поясните принцип представления пульсирующего магнитного поля обмотки в виде двух встречно вращающихся магнитных полей постоянной амплитуды.
199. Поясните особенности МХ однофазного однообмоточного АД и способ его пуска.
200. Чем опасна для трехфазного АД работа с одной оборванной фазой?
201. Поясните устройство и принцип действия однофазного двухобмоточного АД.
202. Как в однофазном двухобмоточном АД получают различные по амплитуде вращающиеся встречно магнитные поля?
203. Как можно создать в однофазном двухобмоточном АД только одно вращающееся поле статора?
204. Поясните работу емкостного ФСУ.
205. Поясните устройство и работу ФСУ на основе различия параметров рабочей и пусковой обмоток.
206. Поясните устройство СГ.
207. Поясните принцип действия СГ.
208. Что такое реакция якоря для СГ?
209. Поясните назначение демпферной обмотки.

210. Поясните построения векторной диаграммы при активной нагрузке СГ.
211. Поясните построения векторной диаграммы при индуктивной нагрузке СГ.
212. Поясните построения векторной диаграммы при емкостной нагрузке СГ.
213. Поясните построения векторной диаграммы при активно-индуктивной нагрузке СГ.
214. Поясните построения векторной диаграммы при активно-емкостной нагрузке СГ.
215. Поясните построение векторной диаграммы явнополюсного СГ.
216. Поясните построение векторной диаграммы явнополюсного СГ по модифицированному уравнению.
217. Как устроен неявнополюсный СГ и каким уравнением электрического состояния он описывается?
218. Поясните построение векторной диаграммы неявнополюсного СГ.
219. Как выводятся упрощенные уравнения явнополюсного и неявнополюсного СГ?
220. Поясните построения векторных диаграмм для явнополюсного и неявнополюсного СГ.
221. Дайте определение характеристике холостого хода и поясните вид графика ее.
222. Дайте определение характеристике короткого замыкания и поясните вид графика ее.
223. Какие величины можно рассчитать по х.х.х. и х.к.з.?
224. Дайте определение нагрузочной характеристике и поясните график ее.
225. Поясните построения для расчета внешней характеристики при активной нагрузке.
226. Поясните построения для расчета внешней характеристики при активно-индуктивной нагрузке.
227. Поясните построения для расчета внешней характеристики при активно-емкостной нагрузке.
228. Поясните внешний вид внешних характеристик СГ.
229. Поясните построения для расчета регулировочной характеристики при активной нагрузке.
230. Поясните построения для расчета регулировочной характеристики при активно-индуктивной нагрузке.

231. Поясните построения для расчета регулировочной характеристики при активно-емкостной нагрузке.
232. Поясните внешний вид регулировочных характеристик СГ.
233. Дайте определение угла нагрузки СГ и поясните, почему угол между магнитными потоками обмотки возбуждения и обмотки статора тоже равен углу нагрузки?
234. Приведите вывод угловых характеристик мощности и момента неявнополюсного СГ.
235. Обоснуйте необходимые условия существования установившегося режима работы ДГА.
236. Обоснуйте достаточные условия существования устойчивого установившегося режима работы ДГА.
237. Поясните способ точной синхронизации.
238. Поясните способ грубой синхронизации.
239. Поясните способ самосинхронизации.
240. Поясните принцип регулирования реактивной мощности СГ, работающего параллельно с сетью.
241. Поясните принцип регулирования активной мощности СГ, работающего параллельно с сетью.
242. Почему при увеличении подачи топлива в дизель увеличивается ток статора СГ?
243. Почему при регулировании активной мощности возникает проблема компенсации реактивной мощности?
244. Почему геометрическими местами концов векторов э.д.с. и токов статора являются прямые линии?
245. Почему нет прямой пропорции между токами возбуждения и статора СГ?
246. Какие задачи могут быть решены с использованием U -образной характеристики?
247. Поясните функциональную схему параллельной работы двух СГ соизмеримой мощности. Какие задачи ставятся перед РЧ и РН обоих СГ?
248. Поясните векторную диаграмму и процессы, происходящие в параллельно работающих СГ одинаковой мощности.
249. Поясните векторную диаграмму и процессы, происходящие в параллельно работающих СГ разной мощности.
250. Поясните схему статического возбудителя и охарактеризуйте его достоинства и недостатки.

251. Поясните схему электромашиного возбудителя и охарактеризуйте его достоинства и недостатки.
252. Поясните схему электромашиного многообмоточного возбудителя и охарактеризуйте его достоинства и недостатки.
253. Поясните схему бесщеточного возбудителя и охарактеризуйте его достоинства и недостатки.
254. Из каких фаз состоит процесс короткого замыкания СГ и каковы оценки тока в различное время?
255. Поясните смысл изменения в процессе к.з. постоянной времени СГ от переходной до собственной.
256. Поясните структуру графика к.з. СГ.
257. Для чего в СГ применяют гашение поля?
258. Поясните способ использования обмоток СД по назначению.
259. Какие механические характеристики СД рассчитываются и используются для управления СД?
260. Как влияет величина пускового сопротивления в цепи ОВ на пусковой и подсинхронный моменты?
261. Поясните схемы пуска СД, отметив их достоинства и недостатки.
262. Как СД можно использовать для компенсации реактивной мощности индуктивного характера в сети?
263. Поясните устройство и принцип действия синхронного компенсатора. Какие показатели электроснабжения улучшает синхронный компенсатор?
264. Поясните устройство и принцип действия синхронно-реактивного двигателя.
265. Поясните способ формирования дискретно вращающегося магнитного поля статора.
266. Обоснуйте вид угловой характеристики вращающего момента ВД.
267. Как можно управлять моментом ВД?
268. Поясните устройство и принцип действия синхронных микромашин с постоянными магнитами.
269. Поясните вид МХ двигателя с постоянными магнитами.
270. Поясните устройство гистерезисного двигателя и его работу при синхронной частоте вращения.
271. Поясните вид асинхронной МХ гистерезисного двигателя.

Изучение дисциплины «Электрические машины» завершается экзаменом. Подготовка к экзамену способствует закреплению, углублению и обобщению знаний, получаемых в процессе обучения, а также применению их к решению практических задач. Готовясь к экзамену, студент ликвидирует имеющиеся пробелы в знаниях, углубляет, систематизирует и упорядочивает свои знания. На экзамене студент демонстрирует то, что он приобрел в процессе обучения по конкретной учебной дисциплине.

На консультации перед экзаменом студентов познакомят с основными требованиями, ответят на возникшие у них вопросы. Поэтому посещение консультаций обязательно.

При подготовке к экзамену необходимо использовать конспекты лекций по дисциплине, учебники и учебные пособия (из списка основной и дополнительной литературы) или конспект литературы, прочитанной по указанию преподавателя в течение семестра.

Вначале следует просмотреть весь материал по сдаваемой дисциплине, отметить для себя трудные вопросы. Обязательно в них разобраться. В заключение еще раз целесообразно повторить основные положения.

Систематическая подготовка к занятиям в течение семестра позволит использовать время экзаменационной сессии для систематизации знаний.

### **Вопросы к экзамену**

1. Устройство трансформатора, назначение катушек и магнитопровода.
2. Принцип действия трансформатора.
3. Коэффициент трансформации  $k_{tr}$  и какие варианты расчета его существуют.
4. Принцип постоянства суммарного магнитного потока  $\Phi_{\Sigma}$ .
5. Коэффициент трансформации токов.
6. Принцип постоянства полной мощности трансформатора.
7. Возможные конструкции систем трансформации трехфазных напряжений.
8. Синусоидальный ток в обмотке трансформатора.
9. Синусоидальная форма вторичного напряжения трехфазного трансформатора.
10. Несинусоидальная форма вторичного напряжения трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток  $Y/Y$ .
11. Синусоидальная форма вторичного напряжения трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток  $Y/\Delta$ .
12. Графики магнитного потока и тока трансформатора при его включении.
13. Силовые трансформаторы

14. Устройство и принцип действия автотрансформатора.
15. Отличия трансформатора и автотрансформатора.
16. Преимущества и недостатки автотрансформатора.
17. Параметры сварочного трансформатора
18. Устройство и принцип действия сварочного трансформатора с регулировочным дросселем и магнитным шунтом.
19. Электромагнитные явления наблюдаются в электрических машинах.
20. Устройство и назначение отдельных элементов ДПТ.
21. Принцип действия ДПТ.
22. Устройство и принцип действия универсального коллекторного двигателя.
23. Принцип действия ГПТ и вид уравнения электрического состояния его якорной цепи.
24. Физика преобразования энергии сторонних механизмов, вращающих якорь ГПТ, в энергию электрическую.
25. Реакция якоря у МПТ.
26. Принцип компенсации реакции якоря с помощью дополнительных полюсов.
27. Требования к обмотке якоря и к установке щеток.
28. Принцип выбора места установки щеток в ГПТ.
29. Принцип суммирования секционных э.д.с. в общую э.д.с. Е ГПТ и принцип согласованности направлений э.д.с., образуемых в параллельных ветвях между щетками.
30. Принцип суммирования механических сил, действующих на стороны активных секций в ДПТ.
31. Принцип выбора места установки щеток в ГПТ.
32. Принцип суммирования механических сил, действующих на стороны активных секций в ДПТ.
33. Как классифицируется ГПТ в зависимости от способа возбуждения?
34. Пояснить внешний вид характеристики холостого хода.
35. Пояснить внешний вид внешней характеристики.
36. Пояснить внешний вид регулировочной характеристики.
37. Поясните процесс самовозбуждения ГПТ с параллельным возбуждением.
38. Поясните вид внешней характеристики ГПТ с параллельным возбуждением.
39. Почему для ГПТ с параллельным возбуждением не опасен режим короткого замыкания.
40. Поясните вид внешней характеристики ГПТ с последовательным возбуждением.

41. Назовите условия введения ГПТ для работы параллельно с сетью бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности.
42. Назовите условия нагружения ГПТ, работающего на сеть бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности.
43. Как регулируется возбуждение параллельно работающих ГПТ, работающих на сеть бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности?
44. "Внешняя характеристика трансформатора" и чем определяется выбор метода ее расчета.
45. Составьте уравнения, описывающие нагруженный трансформатор.
46. Условия проведения опыта холостого хода и определяемые по результатам опыта параметры схемы замещения трансформатора.
47. Условия проведения опыта короткого замыкания и определяемые по результатам опыта параметры схемы замещения трансформатора.
48. Схема замещения трансформатора в режиме к.з.
49. Схемы замещения трансформатора и смысл измеренных сигналов в опыте холостого хода.
50. Схемы замещения трансформатора и смысл измеренных сигналов в опыте короткого замыкания.
51. Схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора и где применяются соответствующие трансформаторы?
52. Поясните схему трехфазного трансформатора с группой 0.
53. Поясните схему трехфазного трансформатора с группой 11.
54. Схема включения трансформатора напряжения. Какие погрешности существуют и как их минимизировать?
55. Схема включения трансформатора тока. Какие погрешности существуют и как их минимизировать?
56. Способы пуска ДПТ и каковы критерии качества процесса пуска.
57. Способ прямого пуска ДПТ. В чем его недостатки.
58. Способ реостатного пуска ДПТ. В чем его достоинства и недостатки.
59. Способ пуска ДПТ с регулируемым якорным напряжением. В чем его достоинства и недостатки.
60. Способы частоты вращения ДПТ и каковы критерии качества процесса регулирования.
61. Способ реостатного регулирования частоты вращения ДПТ. В чем его достоинства и недостатки.



62. Способ якорного регулирования частоты вращения ДПТ. В чем его достоинства и недостатки.
63. Способ полевого регулирования частоты вращения ДПТ. В чем его достоинства и недостатки.
64. Способы частоты вращения ДПТ и каковы критерии качества процесса торможения.
65. Способ торможения ДПТ противовключением и какие имеет характеристики эффективности.
66. Способ динамического торможения ДПТ и какие имеет характеристики эффективности.
67. Вычисления и построения, позволяющие найти вектор.
68. Вычисления и построения, позволяющие найти вектор.
69. Приведите вывод формулы внешней характеристики трансформатора.
70. Расчет принужденной  $i_{пр}$  и свободной  $i_{св}$  составляющих тока к.з.
71. Каковы оценки значения установившегося тока к.з. и чем он опасен для трансформатора?
72. Каковы оценки значения ударного тока к.з. и чем он опасен для трансформатора и защитной аппаратуры?
73. Обоснуйте вид схемы замещения трансформатора при его включении, составьте по схеме дифференциальное уравнение и обоснуйте правомерность использования в расчетах ненасыщенного значения индуктивности  $L_0$ .
74. Расчет схемы замещения для трехфазного трансформатора, работающего на симметричную нагрузку.
75. Расчет схемы замещения для трехфазного трансформатора, работающего на несимметричную нагрузку.
76. Вывод уравнения электрического состояния якорной цепи ДПТ.
77. Уравнение коммутации и найдите его решения для случая идеальной прямойлинейной коммутации.
78. Методы устранения причин механического и электромагнитного искрения щеток.
79. Составьте уравнения цепи обмотки возбуждения и якоря.
80. Выведите выражения ЭМХ и МХ ДПТ.
81. Приведите выражения ЭМХ и МХ в общем виде.
82. Приведите выражения ЭМХ и МХ для линейного участка кривой намагничивания стали магнитопровода.

83. Приведите выражения ЭМХ и МХ для насыщенного участка кривой намагничивания стали магнитопровода.
84. Поясните способ рекуперативного торможения ДПТ и какие имеет характеристики эффективности.
85. Расчет тока короткого замыкания для ГПТ с независимым возбуждением.
86. Расчет тока короткого замыкания для ГПТ с параллельным возбуждением.
87. Составить энергетическую диаграмму и формулу к.п.д.
88. Расчет ЭМХ и МХ двигателя на переменном токе.
89. Устройство и принцип действия асинхронного двигателя.
90. Устройство и принцип действия индукционного регулятора трехфазного напряжения.
91. Виды механических и электрических частот вращения
92. Энергетическая диаграмма АД
93. Приведение ротора к статору по частоте.
94. Приведение ротора к статору по э.д.с. и вид полной схемы замещения АД.
95. Электромеханическая и механическая характеристики АД.
96. Критическое скольжение и момент через параметры обмоток АД.
97. Критический момент через каталожные данные АД.
98. Устойчивость работы "в малом" на рабочем участке МХ АД.
99. Неустойчивость работы "в малом" на разгонном участке МХ АД.
100. Устойчивость работы АД "в большом".
101. Устройство и особенности работы АД с двухклеточным ротором.
102. Процессы вытеснения тока в двухклеточном АД от пуска до выхода на рабочую характеристику установившегося режима.
103. Устройство и принцип действия глубокопазного АД.
104. Законы регулирования скорости АД реализуются при частотном управлении.
105. АД с фазным ротором и какова область его применения.
106. Параметры МХ и ЭМХ при включении в цепь ротора дополнительных сопротивлений.
107. Режим разгона АД с фазным ротором.
108. Принцип изменения числа пар полюсов в полюсопереключаемом АД.
109. Принцип представления пульсирующего магнитного поля обмотки в виде двух встречно вращающихся магнитных полей постоянной амплитуды.
110. Особенности МХ однофазного однообмоточного АД и способ его пуска.

111. Устройство и принцип действия однофазного двухобмоточного АД.
112. Устройство и принцип действия синхронного генератора.
113. Как устроен неявнополюсный СГ и каким уравнением электрического состояния он описывается.
114. Характеристика холостого хода и вид графика ее.
115. Характеристике короткого замыкания и вид графика ее.
116. Нагрузочная характеристика и график ее.
117. Внешний вид внешних характеристик СГ.
118. Внешний вид регулировочных характеристик СГ.
119. Угол нагрузки СГ и поясните, почему угол между магнитными потоками обмотки возбуждения и обмотки статора тоже равен углу нагрузки.
120. Вывод угловых характеристик мощности и момента неявнополюсного СГ.
121. Принцип регулирования реактивной мощности СГ, работающего параллельно с сетью.
122. Принцип регулирования активной мощности СГ, работающего параллельно с сетью.
123. Структура графика к.з. СГ.
124. Механические характеристики СД
125. Устройство и принцип действия синхронного компенсатора.
126. Устройство и принцип действия синхронно-реактивного двигателя.
127. Способ формирования дискретно вращающегося магнитного поля статора.
128. Устройство и принцип действия синхронных микромашин с постоянными магнитами.
129. МХ двигателя с постоянными магнитами.
130. Условия получения вращающегося магнитного поля статора.
131. Вывод суммарного магнитного поля статора в функции линейной координаты круга статора и времени.
132. Схема укладки в пазы однослойной простой и распределенной обмоток статора АД.
133. Схема укладки в пазы концентрической и шаблонной обмоток. Назовите их достоинства и недостатки.
134. Приведение полной схемы замещения АД к упрощенной.
135. Схема укладки в пазы секций полюсной катушки в два слоя.
136. Способ прямого пуска АД.
137. Способ реакторного пуска АД.

138. Способ автотрансформаторного пуска АД.
139. Способ пуска АД путем переключения схемы соединения его статорных обмоток.
140. Способ частотного пуска АД.
141. Способ регулирования частоты АД изменением напряжением питания.
142. Способ регулирования частоты АД изменением частоты напряжения питания.
143. Способ регулирования частоты АД одновременным изменением уровня напряжения питания и его частоты.
144. Способ регулирования частоты вращения АД с помощью добавочных сопротивлений в цепи ротора.
145. Схема и МХ режима торможения АД противовключением.
146. Схема и МХ режима динамического торможения АД.
147. Схема и МХ режима рекуперативного торможения АД при спуске груза.
148. Схема и МХ режима рекуперативного торможения АД при понижении частоты питающего напряжения.
149. Условия существования установившегося режима работы ДГА.
150. Условия существования устойчивого установившегося режима работы ДГА.
151. Способ точной синхронизации ДГА.
152. Способ грубой синхронизации ДГА.
153. Способ самосинхронизации ДГА.
154. Упрощенные уравнения явнополюсного и неявнополюсного СГ.
155. Построение для расчета внешней характеристики при активной нагрузке.
156. Построение для расчета внешней характеристики при активно-индуктивной нагрузке.
157. Построение для расчета внешней характеристики при активно-емкостной нагрузке.
158. Построение для расчета регулировочной характеристики при активной нагрузке.
159. Построение для расчета регулировочной характеристики при активно-индуктивной нагрузке.
160. Схема статического возбудителя и охарактеризуйте его достоинства и недостатки.
161. Схема электромашинного возбудителя и охарактеризуйте его достоинства и недостатки.

162. Схема электромашинного многообмоточного возбuditеля и охарактеризуйте его достоинства и недостатки.

163. Схема бесщеточного возбuditеля и охарактеризуйте его достоинства и недостатки.

164. Схема пуска СД, их достоинства и недостатки.

165. Способ использования обмоток СД по назначению.

166. Расчет-обоснование размеров секций, полюсной катушки и правила укладки ее в пазы статора.

167. Расчет ЭМХ по упрощенной схеме замещения АД.

168. Расчет МХ по упрощенной схеме замещения АД.

169. Вычисления интенсивности полей контуров полюсных катушек и вычисления полного поля катушки.

170. Уравнения заторможенного АД при разомкнутом и замкнутом роторе

171. Расчет сопротивления статора и входные сопротивления АД.

172. Уравнение проводимостей цепи ротора, выраженное через сопротивления клеток для номинального и пускового режима.

173. Расчет ЭМХ и МХ двухклеточного АД.

174. Векторная диаграмма при активной нагрузке СГ.

175. Векторная диаграмма при индуктивной нагрузке СГ.

176. Векторная диаграмма при емкостной нагрузке СГ.

177. Векторная диаграмма при активно-индуктивной нагрузке СГ.

178. Векторная диаграмма при активно-емкостной нагрузке СГ.

## ***Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины***

### ***Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины***

#### ***Перечень основной литературы:***

1. Игнатович В.М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2013. — 182 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34738.html>
2. Дробов А.В. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Дробов, В.Н. Галушко. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2015. — 292 с. — 978-985-503-540-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67795.html>

#### ***Перечень дополнительной литературы:***

1. Электрические машины [Электронный ресурс] : сборник задач / В. И. Парамонова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московская государственная академия водного транспорта, 2015. — 72 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46905.html>

### ***Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине***

1. Методические рекомендации для подготовки к практическим занятиям по дисциплине «Электрические машины».
2. Методические рекомендации для подготовки к лабораторным работам по дисциплине «Электрические машины».
3. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов по дисциплине «Электрические машины».

### ***Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины***

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks