

Шпаргалка
по электронике
и электротехнике

УДК 621.38+621.3
ББК 32.85+31.2я73
Ш83

Шпаргалка по электронике и электротехнике. – М. : Издательство «Окей-книга», 2008. –
Ш83 48 с. – (Скорая помощь студенту). – ISBN 978-5-9745-0304-7.

Настоящее издание поможет систематизировать полученные ранее знания, а также подготовиться к экзамену или зачету и успешно их сдать.

Пособие предназначено для студентов высших и средних образовательных учреждений.

УДК 621.38+621.3
ББК 32.85+31.2я73

По вопросам приобретения книг обращайтесь: группа компаний «Омега-Л»,
123022, Москва, Столярный пер., д. 14, под. 2.
Тел. (495) 777-17-99
(495) 258-08-38
e-mail: zakaz@omega-l.ru www.omega-l.ru
Заказывайте наши книги через интернет-магазин www.sprinter.ru
Тел. (495) 737-03-77

Подписано в печать 03.09.2007. Формат 60×84/16.
Печать офсетная. Печ. л. 3,0. Тираж 5000 экз. Заказ № 7698.

Отпечатано с готовых диапозитивов в ОАО ордена «Знак Почета»
«Смоленская областная типография им. В. И. Смирнова».
214000, г. Смоленск, проспект им. Ю. Гагарина, 2.

Содержание

1. Классификация электрических цепей. Понятие о двухполюсниках. Сопротивление проводников 5	19. Способы соединения фаз источников и приемников. Положительные направления ЭДС, напряжений и токов 13
2. Использование законов Ома и Кирхгофа при расчете и анализе электрических цепей 5	20. Соотношения между фазными и линейными напряжениями источников. Номинальные напряжения 13
3. Электрические цепи с одним источником энергии и пассивными элементами. Простейшая цепь с одним приемником 5	21. Соединения приемников звездой 15
4. Электрические цепи с последовательным соединением резистивных элементов 5	22. Соединения приемников треугольником 15
5. Электрические цепи с параллельным соединением резистивных элементов 7	23. Устройство и принцип действия магнитных устройств 15
6. Электрические цепи, содержащие соединение резистивных элементов треугольником 7	24. Понятие о двухтактных и трехтактных магнитных устройствах 15
	25. Магнитоэлектрическая и электромагнитная системы 17
	26. Электродинамическая система 17
	27. Погрешности измерений электроизмерительных приборов 17
	28. Измерение тока 17
	29. Измерение напряжения 19
41. Пуск двигателей 25	63. Угловая и механическая характеристика синхронного двигателя 35
42. Тормозные режимы работы двигателей 25	64. Пуск синхронного двигателя 35
43. Потери мощности и КПД машин постоянного тока 25	65. Аппаратура автоматического управления и простейшие схемы управления электроприводами 37
44. Устройство асинхронного двигателя трехфазного тока, принцип действия асинхронного двигателя 25	66. Бесконтактные системы управления 37
45. Вращающееся магнитное поле 27	67. Трехэлектродные лампы. Действие управляющей сетки 37
46. ЭДС, частота тока ротора, скольжение 27	68. Электроизмерительные лампы 37
47. Электромагнитная мощность и потери в асинхронном двигателе 27	69. Электронно-лучевые трубки 39
48. Момент, развиваемый двигателем 27	70. Фотоэлементы с внешним фотоэффектом 39
49. Механическая характеристика асинхронного двигателя 29	71. Электропроводность полупроводников 39
50. Паспортные данные двигателя. Расчет и построение механической характеристики 29	72. Свойства р-п-перехода 39
	73. Устройство и принцип действия точных триодов 41
	74. Принцип действия усилителя 41
	75. Характеристики усилителей 41
	76. Классы усиления 41

31. Измерение сопротивлений	19	7. Понятие об источнике тока	7
30. Измерение мощности	19	8. Метод законов Кирхгофа.	
32. Электронно-лучевой		Метод контурных токов	7
осциллограф	19	9. Метод узлового напряжения	9
33. Назначение, устройство		10. Метод наложения	9
и принцип действия трансформатора	21	11. Метод эквивалентного	
34. Трехфазные трансформаторы	21	генератора (МЭГ)	9
35. Потери мощности		12. Получение синусоидальной ЭДС.	
и КПД трансформатора	21	Основные соотношения	9
36. Назначение и устройство машин		13. Цепь, содержащая катушку	
постоянного тока	21	с активным сопротивлением R	
37. Принцип действия генератора		и индуктивностью L	11
и двигателя	23	14. Цепь, содержащая резистивный	
38. ЭДС якоря и электромагнитный		и емкостный элементы	11
момент машин постоянного тока	23	15. Последовательное	
39. Явление коммутации		соединение R, L, C	11
в машинах постоянного тока	23	16. Активная, реактивная	
40. Классификация генераторов		и полная мощности цепи	11
постоянного тока		17. Резонанс напряжений	13
по способу возбуждения.		18. Резонанс токов	13
Схемы включения генераторов	23		
77. Виды обратной связи.		51. Пуск асинхронных двигателей	29
Усилитель напряжения	43	52. Энергетические показатели	
78. Двухтактные усилители мощности	43	асинхронного двигателя	29
79. Усилители мощности		53. Асинхронный тахогенератор	31
на полупроводниковых триодах	43	55. Понятие о линейном	
80. Генераторы гармонических		трехфазном асинхронном двигателе	31
колебаний типа RC	43	54. Вращающийся	
81. Генераторы		трансформатор	31
с самовозбуждением		56. Назначение и устройство	
на полупроводниковых триодах	45	синхронных машин	31
82. Генераторы низкой		57. Принцип действия генератора	33
частоты на биполях	45	58. Принцип действия двигателя	33
83. Принцип действия		59. Схема включения	
выпрямительного устройства	45	и основные зависимости	
84. Стабилизатор тока	45	синхронного генератора	33
85. Стабилизатор		60. Векторные диаграммы	
постоянного напряжения	47	синхронного генератора	33
87. Распространение		61. Основные характеристики	
электромагнитных волн различных длин	47	синхронного генератора	35
86. Амплитудная модуляция	47	62. Векторные диаграммы	
88. Основные положения радиосвязи	47	синхронного двигателя	35

1

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ. ПОНЯТИЕ О ДВУХПОЛЮСНИКАХ. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

Электрические цепи (ЭЦ) делятся на несколько групп.

1. Электрические цепи постоянного тока:
 - 1) неразветвленные и разветвленные;
 - 2) с одним и более активным элементом;
 - 3) линейные и нелинейные.
2. Электрические цепи синусоидального тока.
3. Трёхфазные электрические цепи.

Примером электрической цепи постоянного тока может быть **двухполюсник**. Он представляет собой часть электрической цепи, которая с помощью имеющихся у нее двух выводов может соединяться с другой частью электрической цепи.

В составе электрических цепей выделяются **активные** и **пассивные** элементы. Элементы, которые обладают способностью накапливать или, наоборот, рассеивать энергию, называются **пассивными элементами электрической цепи**. Таким образом, двухполюсники в зависимости от типа включенных в них элементов могут быть **пассивными** либо **активными**. Сопротивление проводника с постоянной по всей длине площадью поперечного сечения определяется по формуле:

$$r = \frac{\rho l}{S}$$

где l — длина проводника, м;

2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАКОНОВ ОМА И КИРХГОФФА ПРИ РАСЧЕТЕ И АНАЛИЗЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Для расчета и анализа электрических цепей используются законы Ома и Кирхгоффа.

Для участка цепи без источников тока закон Ома звучит следующим образом: ток I на участке цепи с активным сопротивлением R определяется как отношение напряжения U на этом участке к активному сопротивлению R .

$$I = \frac{U}{R}$$

Для полной замкнутой цепи закон Ома имеет вид:

$$I = \frac{\sum_{k=1}^n E_k}{\sum_{k=1}^n R_k + \sum_{k=1}^m r_k}$$

где R — внешнее сопротивление цепи;

r — внутреннее сопротивление цепи.

Ток в **неразветвленной замкнутой цепи** равен отношению алгебраической суммы ЭДС к сумме всех сопротивлений цепи.

В случае совпадения направления ЭДС с направлением тока ставится знак плюс, в противном случае — минус.

3

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ И ПАССИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ. ПРОСТЕЙШАЯ ЦЕПЬ С ОДНИМ ПРИЕМНИКОМ

Все элементы электрической цепи характеризуются вольт-амперной характеристикой (ВАХ). ВАХ выражает зависимость напряжения на зажимах элемента ЭЦ и тока, протекающего через этот элемент.

Пассивными элементами электрической цепи называются элементы, обладающие способностью накапливать или рассеивать энергию.

В эту группу включаются: резистивный, индуктивный и емкостной элементы.

Сопротивление — элемент ЭЦ, в котором производится преобразование электрической энергии в тепловую, причем этот процесс происходит необратимо.

Обозначается латинской буквой R и измеряется в Омах (Ом):

$$U = RI,$$

$$R = \frac{U}{I}. \quad (1)$$

Индуктивность — элемент ЭЦ, магнитное поле которого накапливает энергию; обозначается латинской заглавной буквой L и измеряется в единицах генри (Гн):

$$U_L = L \frac{dI}{dt}. \quad (2)$$

4

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИЕМ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Последовательное соединение — это соединение, при котором условный конец первого элемента соединяется с условным началом второго, конец второго — с началом третьего и т.д.

Последовательное соединение элементов характеризуется наличием одинакового тока во всех частях цепи.

Основные соотношения при последовательном соединении n резистивных элементов имеют вид:

$$I = \frac{U}{\sum_{k=1}^n R_k}; \quad U_k = I R_k; \quad P_k = I U_k = P R_k \quad (k = 1, 2, \dots, n),$$

Для всей цепи:

$$U = \sum_{k=1}^n U_k = I \sum_{k=1}^n R_k; \quad P = \sum_{k=1}^n P_k = I U.$$

Как видно из приведенных формул, результирующее сопротивление цепи складывается из значений сопротивлений каждого элемента, входящего в цепь.

Тогда налицо зависимость параметров электрической цепи от количества элементов цепи: с уменьшением количества элементов общее сопротивление цепи уменьшается, что приво-

Первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма токов в узле электрической цепи равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0.$$

Или, сумма токов, входящих в узел, равна сумме исходящих токов, т.е.

$$\sum_{k=1}^n I_{\text{вх}} = \sum_{k=1}^n I_{\text{исх}}.$$

Токи, входящие в узел, должны браться со знаком, противоположным знаку исходящих токов. Например, входящие в узел токи нужно брать со знаком «плюс», а исходящие — «минус», или наоборот.

Легко заметить сходство первого закона Кирхгофа с законом сохранения количества электричества, который звучит так: **заряд, приходящий к узлу за некоторый интервал времени, равен заряду, уходящему за этот же интервал времени от узла.** Иначе говоря, заряд в узле не накапливается и не исчезает.

Второй закон Кирхгофа: в любом замкнутом контуре алгебраическая сумма падений напряжений на сопротивлениях и алгебраическая сумма падений напряжений на обрывах равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом замкнутом контуре.

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k + \sum_{m=1}^m U_m = \sum_{k=1}^k E_k.$$

дит к увеличению тока, напряжения и соответственно мощности оставшихся элементов.

У последовательного соединения элементов имеется один существенный недостаток: если один из приемников потерял свою работоспособность, автоматически происходит отключение и всех остальных приемников.

Поэтому чаще всего применяется параллельное соединение.

Характерной чертой всех элементов электрической цепи является вольт-амперная характеристика, которая показывает зависимость напряжения и тока.

Элементы, которые обладают способностью накапливать или, наоборот, рассеивать энергию и называются **пассивными элементами электрической цепи.** В эту группу включаются: резистивный, индуктивный и емкостной элементы.

Сопротивление — электрическая характеристика элемента электрической цепи, описывающая его способность препятствовать прохождению через него постоянному току:

$$U = RI;$$

$$R = \frac{U}{I}.$$

S — площадь поперечного сечения проводника, м²;

ρ — удельное сопротивление материала, из которого изготовлен проводник, Ом.

$$1 \text{ кОм} = 10^3 \text{ Ом};$$

$$1 \text{ Мом} = 10^6 \text{ Ом}.$$

Величина, обратная сопротивлению, называется **проводимостью**:

$$g = \frac{1}{R} [\text{См}].$$

Единица измерения проводимости называется «симено».

Значение сопротивления зависит от температуры: с увеличением температуры в металлических проводниках сопротивление повышается. Эту зависимость можно выразить с помощью формулы:

$$r_t = r_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)],$$

где t_1, t_2 — соответственно, начальное и конечное значения температуры, °C;

r_1, r_2 — сопротивления при температурах t_1, t_2 , Ом;

α — температурный коэффициент сопротивления, °C⁻¹.

Емкость — элемент ЭЦ, электрическое поле которого обладает способностью накапливать энергию; обозначается C и измеряется в фарадах (Ф).

$$U_C = \frac{1}{C_0} \int i dt. \quad (3)$$

Рассмотрим простейшую электрическую цепь (рис. 1).



Рис. 1. Схема простейшей электрической цепи с одним приемником

Применительно данной схемы для расчета можно воспользоваться вторым законом Кирхгофа:

$$E = I r_0 + I r; \quad (4)$$

$$E = I r_0 + U. \quad (5)$$

С помощью этих уравнений мы можем посчитать значение тока и напряжения:

$$I = \frac{E}{r_0 + r}; \quad U = E - I r_0$$

5

5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Параллельное соединение — это соединение резистивных элементов, при котором соединяются между собой условные начала всех элементов и условные концы.

При параллельном соединении напряжение всех элементов является величиной постоянной. Достоинствами такого соединения являются отсутствие необходимости в согласовании номинальных значений приемников, наличие возможности альтернативной работы какого-либо из приемников.

Также сюда включается и то, что при потере работоспособности одного из приемников остальные продолжают свою работу.

Электрические цепи с параллельным соединением элементов характеризуются при помощи эквивалентного сопротивления. При замене параллельно включенных сопротивлений одним эквивалентным необходимо соблюдение условия равенства эквивалентного тока и тока неразветвленного участка цепи:

$$I_{\text{вх}} = I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

Данное уравнение можно записать в виде:

$$G_{\text{вх}} U = G_1 U + G_2 U + \dots + G_n U,$$

откуда эквивалентная проводимость определяется как сумма всех проводимостей цепи:

$$G_{\text{вх}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n$$

6

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ, СОДЕРЖАЩИЕ СОЕДИНЕНИЕ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Соединение треугольником — это соединение, в котором выводы трех элементов последовательно соединены между собой (вывод первого с выводом второго, второго — с третьим, а третьего — с первым). Дополнительные части электрической цепи подключаются к узловым точкам. Расчет таких цепей несколько усложнен, в связи с чем соединение треугольником заменяют соединением звездой.

В качестве примера можно рассмотреть мостовую цепь (рис. 2), где расположение резистивных элементов представлено смежными треугольниками. В мостовых цепях соединение треугольником целесообразно заменять на соединение звездой. В этом случае мы получим смешанное соединение резистивных элементов.



Рис. 2(а). Схема мостовой электрической цепи

7

ПОНЯТИЕ ОБ ИСТОЧНИКЕ ТОКА

Очень часто в практике анализа и расчета электрических цепей применяются источники ЭДС. Они характеризуются параметрами E и r . В некоторых случаях такие источники заменяют источниками тока, эквивалентными источнику ЭДС. Здесь в качестве параметров выступают ток короткого замыкания I_k и сопротивление r .

Эквивалентный источник тока считается таковым при том условии, что величина тока, напряжения и мощности источника при различных значениях внешнего сопротивления не изменяется после произведенной замены.

Источник ЭДС имеет следующую характеристику:

$$U = E - Ir$$

При делении обеих частей данного уравнения на величину сопротивления r получим характеристику источника тока:

$$\frac{U}{r} = \frac{E}{r} - I \quad \text{или} \quad I_k = I_0 + I,$$

где I_k — ток короткого замыкания источника ЭДС; I_0 — некоторый ток, равный отношению напряжения E к сопротивлению r .

Данное соотношение показывает, что в электрической цепи с источником тока необходимо наличие двух ветвей параллельного соединения резисторов. Ветвь с током короткого замыкания I располагается параллельно указанным ветвям.

8

МЕТОД ЗАКОНОВ КИРХГОФФА. МЕТОД КОНТУРНЫХ ТОКОВ

Метод контурных токов заключается в составлении системы уравнений с использованием второго закона Кирхгофа для контурных токов, сопротивлений и ЭДС. При использовании данного метода необходимо выделить на схеме электрической цепи независимые контуры, в каждом из которых задать контурный ток, указав его направление.

Если одна и та же ветвь одновременно принадлежит двум контурам, ток данной ветви принимается равным сумме контурных токов, протекающих через эту ветвь.

Рассмотрим пример решения электрической цепи, изображенной на рисунке 3.

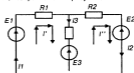


Рис. 3. Пример электрической цепи, рассчитываемой методом контурных токов

По первому закону Кирхгофа имеем:

$$I_1 = I_2 = I_3 = 0. \quad (1)$$



Рис. 2(б). эквивалентная ей схема с соединением резистивных элементов звездой

Перед осуществлением замены треугольника на звезду необходимо учесть предъявляемые при этом требования.

К ним относятся следующие: токи в части электрической цепи, оставшейся без изменения, и напряжения между узлами, поменявшими свое месторасположение (в нашем примере — узлы ab, bc, ca), должны быть равны своим первоначальным значениям. **Формулы перехода от треугольника к звезде:**

$$R_a = \frac{R_{ab}R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} = \frac{R_{ab}R_{ca}}{\sum R_k};$$

$$R_b = \frac{R_{ab}R_{bc}}{\sum R_k}; \quad R_c = \frac{R_{ca}R_{bc}}{\sum R_k}.$$

Для первого выделенного контура по второму закону Кирхгофа составим уравнение:

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 = E_1 - E_2 \quad (2)$$

Для второго контура уравнение имеет вид:

$$R_2 I_2 - R_3 I_3 = E_2 - E_2 \quad (3)$$

Получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} R_1 I_1 + R_2 (I_1 - I_3) = E_1 - E_2; \\ R_2 I_2 - R_3 (I_1 - I_2) = E_2 - E_2. \end{cases} \quad (4)$$

Произведя соответствующие преобразования, получим:

$$\begin{cases} (R_1 + R_2) I_1 - R_2 I_3 = E_1 - E_2; \\ -R_3 I_1 + (R_2 + R_3) I_2 = E_2 - E_2. \end{cases} \quad (4')$$

В данном примере:

$$I_1 = I_1, \quad I_2 = I_2$$

Ветвь, которая одновременно принадлежит двум и более контурам, называется **смежной ветвью**. Ток I_3 смежной ветви определяется как алгебраическая сумма контурных токов I_1 и I_2 :

$$I_3 = I_1 + I_2.$$

Сопротивление принадлежит одновременно двум контурам, в связи с чем вводится понятие **взаимного сопротивления контуров**.

Замечание: если направление ЭДС совпадает с направлением соответствующего контурного тока, то ЭДС в уравнение входит со знаком «плюс»; если не совпадает — со знаком «минус».

Тогда для эквивалентного сопротивления формула будет иметь вид:

$$\frac{1}{r_{\text{эк}}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{r_k}.$$

Проанализировав полученные выражения, делаем следующие выводы: параллельное соединение элементов характеризуется эквивалентной проводимостью, определяемой как сумма проводимостей ветвей, входящих в цепь. Если к цепи, состоящей из n параллельно включенных элементов, подключить еще один элемент (общее количество элементов составит $n + 1$), то будет наблюдаться увеличение проводимости цепи, при этом значение эквивалентного сопротивления уменьшится.

Основные соотношения:

$$I_k = \frac{U}{r_k} = U g_k; \quad P_k = U I_k = \frac{U^2}{r_k} = U^2 g_k = I_k^2 r_k.$$

Для всей цепи:

$$I = \sum_{k=1}^n I_k = U \sum_{k=1}^n \frac{1}{r_k} = U \sum_{k=1}^n g_k.$$

Выделим зависимость параметров электрической цепи от количества элементов цепи: с увеличением количества параллельно соединенных элементов общее сопротивление цепи уменьшается, что приводит к увеличению тока и соответственно общей мощности, поскольку напряжение не изменяется.

Уравнение внешней характеристики источника тока имеет вид:

$$I = I_k - I_3 = I_k - \frac{U}{r_3}.$$

С помощью данного уравнения мы получим то же значение тока и напряжения, что и при использовании источника ЭДС.

Для холостого хода имеем следующие соотношения:

$$r = \infty, \quad r_p = \frac{r_3}{r + r_3} = 0, \quad U = I_k r_p = I_k \cdot 0.$$

Для источника тока ($I_k = E$) Тогда:

$$U = E, \quad I = \frac{U}{r} = \frac{E}{r} = 0.$$

Соотношения для короткого замыкания:

$$r = 0; \quad r_p = \frac{r_3}{r + r_3} = 0; \quad U = I_k r_p = 0;$$

$$I_k = \frac{U}{r_3} = 0; \quad I = I_k.$$

Одним из случаев применения источника тока вместо источника ЭДС является случай, когда $r_k \gg r_3$ где r_3 представляет собой сумму внутреннего сопротивления источника ЭДС и сопротивления какого-либо последовательно включенного резистивного элемента ветви с источником.

9 МЕТОД УЗЛОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Метод узлового напряжения называют также **методом узловых потенциалов**. Этот метод заключается в нахождении потенциалов узлов электрической цепи с помощью составления системы уравнений по первому закону Кирхгофа. При решении задач в этом случае выбирается **базисный узел**, значение потенциала которого принимается равным нулю. Значения остальных потенциалов представляют собой некоторые неизвестные функции, которые находятся из решения составленной системы уравнений относительно базового узла. В схеме электрической цепи может встретиться ветвь, содержащая источник тока.



Рис. 4. Электрическая цепь, решаемая методом узловых потенциалов

Решать задачи проще, придерживаясь определенного алгоритма.

1. Необходимо выбрать базисный узел и значение его потенциала принять равным нулю. Пронумеровать все имеющиеся в схеме электрической цепи узлы. В нашем примере за базисный принят узел с порядковым номером «0». Производится вычисление узловых токов (J_1, J_2 и т. д.).

11. МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА (МЭГ)

Метод эквивалентного генератора: если часть линейной электрической цепи заменить на эквивалентный источник напряжения, то ток любой отдельно взятой ветви этой цепи не изменится. Необходимо также произвести замену источников ЭДС и тока на их внутренние сопротивления:

$$E_2 = (U_{U2}), R_2 = (R_{U2}),$$

где (U_{U2}) , (R_{U2}) — соответственно напряжение и сопротивление между узлами ветви на холостом ходу.

Можно также произвести замену на эквивалентный источник тока. Применение МЭГ целесообразно тогда, когда необходимо найти напряжение или ток на определенном участке цепи. Остальные элементы цепи во внимание не принимаются. Метод эквивалентного генератора не применим для расчета эквивалентной мощности. Рассмотрим применение МЭГ для схемы, изображенной на рисунке 7.

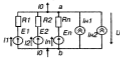


Рис. 7. Схема цепи для решения методом эквивалентного генератора

10 МЕТОД НАЛОЖЕНИЯ

Данный метод справедлив только для линейных цепей электрического тока.

При использовании метода наложения необходимо рассчитать все частные токи цепи. Действие остальных токов исключается из расчетов, но одновременно в схему включаются их внутренние сопротивления. Значение тока схемы электрической цепи находится путем алгебраического сложения всех частных токов.

С помощью метода наложения (или, как его еще называют, **метода суперпозиции**), можно рассчитать и напряжения в цепи. Однако этот метод не применяется к расчету мощности. Рассмотрим пример применения метода наложения для решения электрической цепи, изображенной на рисунке 5.

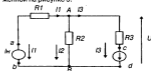


Рис. 5. Электрическая цепь для применения метода наложения

Решить эту схему можно двумя способами: заменив источник тока разрывом либо заменив ЭДС на КЗ (короткое замыкание) (рис. 6а и 6б соответственно).

12 ПОЛУЧЕНИЕ СИНУСОИДАЛЬНОЙ ЭДС. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Помимо постоянного тока, выделяется также и переменный ток, примером которого является синусоидальный ток.

Значение переменного синусоидального тока со временем меняется по синусоидальному закону.

Частота колебаний является обратной периоду величиной:

$$f = \frac{1}{T}.$$

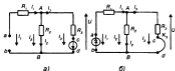
Частота измеряется в герцах (Гц) и характеризует количество колебаний, произошедших за единицу времени.

Для характеристики синусоидального тока часто используют его среднее значение:

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt.$$

Среднее значение переменного тока представляет собой площадь прямоугольника со сторонами $T/2$ и I . Среднее значение переменного тока целесообразно вычислять за половину периода. Это связано с тем, что среднее значение тока за полный период равно нулю в силу равенности площадей верхней и нижней полуовал, а также в силу противоположности их по знаку.

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt.$$



13 ЦЕПЬ, СОДЕРЖАЩАЯ КАТУШКУ С АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ R И ИНДУКТИВНОСТЬЮ L

Характеристикой катушек электромагнитических приборов и устройств является индуктивность L. Активное сопротивление R и индуктивное сопротивление катушек обозначается X_L .



Рис. 8. Пример электрической цепи, содержащей индуктивный элемент

Составим выражение для напряжений, используя второй закон Кирхгофа:

$$U = U_R + U_L$$

Учитывая, что $u = iR$, а $i = I_m \sin \omega t$, получим:

$$u = I_m R \sin \omega t + I_m X_L \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (1)$$

14 ЦЕПЬ, СОДЕРЖАЩАЯ РЕЗИСТИВНЫЙ И ЕМКОСТЫЙ ЭЛЕМЕНТЫ

Емкость — элемент ЭЦ, электрическое поле которого обладает способностью накапливать энергию; обозначается C и измеряется в фарадах (Ф); тогда емкость определяется как отношение заряда к обмоткам емкости:

$$C = \frac{dq}{dt}$$

Основные соотношения

$$I_m = \omega C U_m; I_m = \frac{U_m}{1/\omega C}, \quad (1)$$

$$I = \frac{U}{1/\omega C} = \frac{U}{X_C}, \quad (2)$$

Формула (2) представляет собой закон Ома

для цепи, содержащей емкость, где $X_C = \frac{1}{\omega C}$.

$$U = U_C = I X_C \quad (3)$$

Мгновенная мощность:

$$p = u i = U_m \sin \omega t I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t = U I \sin 2\omega t = P_m \sin 2\omega t. \quad (4)$$

15 ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ R, L, C

Напряжение определяется как векторная сумма напряжений резистивного, емкостного и индуктивного элементов:

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C$$

Напряжение и ток резистивного элемента совпадают по фазе, в емкостном элементе ток опережает напряжение на угол $\pi/2$, имеем:

$$\begin{aligned} \dot{U}_m &= \dot{U}_{mR} + \dot{U}_{mL} + \dot{U}_{mC} = \\ &= U_m \cos \varphi + U_m \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) + U_m \cos \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} U_m &= R I_m \cos \varphi + j \omega L I_m \cos \varphi - j \frac{1}{\omega C} I_m \cos \varphi = \\ &= I_m \left(R + j \omega L - j \frac{1}{\omega C} \right) \end{aligned}$$

В комплексной форме значение сопротивления цепи определяется по следующей формуле:

$$Z = \frac{U}{I} = R + jX = Z e^{j\varphi},$$

где $X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$;

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R}; Z = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

16 АКТИВНАЯ, РЕАКТИВНАЯ И ПОЛНАЯ МОЩНОСТИ ЦЕПИ

Активная мощность — это среднее значение мгновенной мощности за период:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = UI \cos \varphi, \quad (1)$$

где $\cos \varphi$ — коэффициент мощности.

В соответствии с (1) активная мощность определяется как произведение действующих значений напряжения и тока, а также косинуса угла φ . Угол φ представляет собой величину сдвига фаз между векторами тока и напряжения.

Единицей измерения активной мощности является ватт (Вт). Мощность характеризует энергию, которую источник передает присоединяемым элементам (нагрузке).

С учетом того, что $U = ZI$, мощность можно определить как:

$$P = P^a = g U^2. \quad (2)$$

Реактивная мощность — мощность, характеризующая энергию циркулирующую между источником и нагрузкой, которая включает в себя индуктивные L и емкостные C элементы.

$$Q = Q^r = g U^2 = Z^2 \sin \varphi = UI \sin \varphi. \quad (3)$$

Единицей измерения реактивной мощности является реактивный вольт-ампер [вар]. Если в цепи наблюдается индуктивная нагрузка ($\varphi > 0$), то $Q > 0$; если нагрузка емкостная ($\varphi < 0$), то $Q < 0$.

Вектор напряжения резистивного элемента совпадает с вектором тока, но при этом вектор тока опережает вектор напряжения емкости на 90° .

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}; \quad U = \sqrt{(IR)^2 + (IX_C)^2};$$

$$U = I\sqrt{R^2 + X_C^2}. \quad (7)$$

Закон Ома:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = \frac{U}{Z}. \quad (8)$$

Поскольку ток опережает по фазе напряжения i и C на угол φ , то:

$$u = U_m \sin(\omega t - \varphi), \quad (9)$$

$$\cos \varphi = \frac{r}{z} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + X_C^2}}. \quad (10)$$

Определим значения мгновенной и средней мощности:

$$p = u i = I_m \sin \omega t U_m \sin(\omega t - \varphi); \quad (11)$$

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_m U_m \sin \omega t \times \sin(\omega t - \varphi) dt =$$

$$= UI \cos \varphi = UI \frac{r}{z} = I^2 r = P. \quad (12)$$

Полная мощность цепи — это максимальное значение активной мощности.

$$S = UI.$$

Единицей измерения полной мощности является вольт-ампер (ВА). При условии, что

$$U = ZI = \frac{I}{y}, \text{ получим:}$$

$$S = ZI^2 \frac{P}{y}, \quad (5)$$

где z — полное сопротивление цепи;
 y — полная проводимость цепи.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad (6)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (7)$$

Коэффициент мощности $\cos \varphi$ характеризует долю активной мощности в составе полной мощности цепи.

Он в совокупности с полной мощностью и дополнительными параметрами используется при расчетах габаритных размеров электротехнических приборов, таких как генераторы, двигатели, трансформаторы и т.д.

Значения активной, реактивной и полной мощности измеряют ваттметрами, вольтметрами и амперметрами. С помощью ваттметра получают значение активной мощности цепи.

Следовательно, индуктивное сопротивление опережает ток по фазе на 90° .

Если мы выразим напряжение через значения тока и сопротивления, то получим закон Ома для электрической цепи, содержащей катушку:

$$U = \sqrt{(IR)^2 + (IX_L)^2} = I\sqrt{R^2 + X_L^2}; \quad (2)$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{U}{z}, \quad (3)$$

где z — полное сопротивление цепи.

Ток отстает от напряжения по фазе на угол φ , который определяется:

$$\cos \varphi = \frac{U_r}{U} = \frac{Ir}{Iz} = \frac{r}{z} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + X_L^2}}. \quad (4)$$

Для характеристики цепи с индуктивностью L и активным сопротивлением r используются понятия мгновенной и средней мощности:

$$p = u i = I_m \sin \omega t U_m \sin(\omega t + \varphi); \quad (5)$$

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T U_m I_m [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] dt = UI \cos \varphi.$$

В соответствии с (4) значение средней мощности будет определяться:

$$P_{av} = UI \frac{r}{z} = I^2 r = P. \quad (6)$$

Соотношение сопротивления индуктивного элемента X и сопротивления емкости X определяет, какой характер носит поведение цепи:

1. $X_L > X_C$; $\varphi > 0$; индуктивный характер цепи, т.е. напряжение опережает ток по фазе. Здесь значение амплитуды тока равно:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + X^2}}. \quad (3)$$

2. $X_L < X_C$; $\varphi < 0$; емкостной характер цепи, т.е. напряжение отстает от тока по фазе. Амплитуда тока определяется по формуле (3).

3. $X_L = X_C$; $\varphi = 0$; характер активного сопротивления, т.е. напряжение совпадает с током по фазе. В этом случае:

$$I_m = \frac{U_m}{R}. \quad (4)$$

Третье условие является условием резонанса. При этом напряжения емкостного и индуктивного элементов достигают значений, сильно превышающих значение входного напряжения. Частота резонанса равна:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

17 РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

Условие резонанса выполняется, когда справедливо следующее равенство:

$$X_C = X_L; \phi = 0. \quad (1)$$

Резонанс напряжений наблюдается в цепях последовательного соединения R, L, C .

При этом в емкостных и индуктивных элементах напряжения достигают значений, во много раз превышающих значение входного напряжения.

Частота резонанса равна:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2)$$

Характеристическое сопротивление цепи при резонансе имеет вид:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (3)$$

Основные соотношения при резонансе
Выражение (3) показывает, что значение характеристического сопротивления зависит только от параметров индуктивности и емкости, а значение частоты влияния не оказывает.

Когда в цепи возникает явление резонанса, значения индуктивного и емкостного напряжений уравниваются, т.е.:

$$U_L = U_C. \quad (4)$$

18 РЕЗОНАНС ТОКОВ

Резонанс токов наблюдается в цепях с параллельным соединением R, L, C . Также резонанс токов возможен в цепях, содержащих ветви с индуктивностью L и сопротивлением r , а также с конденсатором C и сопротивлением g .

Резонанс токов — это явление, при котором ток цепи по фазе совпадает с напряжением.

Реактивная мощность в этом случае равна нулю, таким образом, в цепи присутствует только активная составляющая мощности.

Условием возникновения резонанса токов является равенство реактивных составляющих токов ветвей с емкостными и индуктивными элементами ($I_C = I_L$).

$$I = I_C = I_L = 0.$$

Частота резонанса токов контура равна:

$$P_r = 3U\cos\varphi_r.$$

Так же как и при резонансе напряжений, при резонансе токов коэффициент мощности будет равен единице:

$$\cos\varphi = 1.$$

Полная мощность цепи содержит только активную составляющую:

$$Q = Q_L - Q_C = 0 \Rightarrow S = P.$$

При резонансе суммарная энергия контура постоянна.

19 СПОСОБЫ СОЕДИНЕНИЯ ФАЗ ИСТОЧНИКОВ И ПРИЕМНИКОВ. ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЭДС, НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ

Трехфазная электрическая цепь — цепь, в ветвях которой действуют три одинаковые по амплитуде синусоидальные ЭДС с одной и той же частотой, одна от другой сдвинутые по фазе на угол $2\pi/3$.

Достоинства трехфазных электрических цепей:

- 1) возможность получать вращающееся магнитное поле;
- 2) возможность использования асинхронных электродвигателей, являющихся более экономичными и простыми в использовании;
- 3) экономия проводниковых материалов, достигаемая за счет уменьшения количества соединительных проводов;
- 4) применение трехфазных генераторов и трансформаторов, более эффективных с экономической точки зрения, и т.п.

Выделяются два способа соединения фаз источников и приемников: соединение звездой и треугольником.

Порядок способов применяется в экономических целях для снижения затрат на полупроводниковые материалы за счет уменьшения количества проводов, используемых для соединения электрических цепей.

Соединение треугольником — это соединение, в котором выводы трех элементов последовательно соединены между собой (вывод первого с выводом второго, второго — с третьим, а третьего — с первым). Дополнительные

20 СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ФАЗНЫМИ И ЛИНЕЙНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ ИСТОЧНИКОВ. НОМИНАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

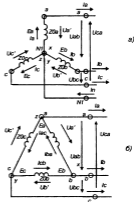


Рис. 9. Схема соединения фаз звездой (а) и треугольником (б)

Индуктивный и емкостный элементы лишь обмениваются энергией между собой: при максимальном значении энергии, накопленной в индуктивности, значение энергии на конденсаторе равно нулю, и наоборот.

Несмотря на значения токов в каждой из ветвей цепи, суммарный ток цепи по своей величине может быть меньше этих значений. Это зависит от того, сочетанием каких параметров характеризуется электрическая цепь.

При необходимости резонанс получают либо по подбору необходимой частоты сети при условии, что параметры электрической цепи известны, либо, наоборот, по подбору параметров цепи при известном значении частоты сети.

В промышленности чаще всего используют установки переменного тока с активно-индуктивным характером.

Однако они имеют существенный недостаток: повышенное потребление реактивной мощности и малый коэффициент мощности. Среди подобных установок и приборов можно выделить асинхронные двигатели, установки электрической сварки и т.п.

Для устранения указанных недостатков подключается батарея конденсаторов параллельно потребителю.

За счет того, что $Q = Q_L - Q_C$, общая мощность установки становится меньше, а соответственно и коэффициент мощности.

Напряжение активного сопротивления становится равным внешнему напряжению цепи:

$$U_r = I r = U. \quad (5)$$

Определим, какое значение принимает при резонансе реактивная и полная мощность цепи:

$$U_c = U_c = Q = Q_L - Q_C = U_L I - U_C I = 0. \quad (6)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = P, \quad (7)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{r}{Z} = 1 \quad (8)$$

$$(\dot{U}_m)_0 = j\omega_0 L \dot{I}_m = j \frac{\omega_0 L}{R} U_m = \frac{\rho}{R} U_m e^{j\frac{\pi}{2}}; \quad (9)$$

$$(\dot{U}_m)_0 = \frac{1}{j\omega_0 C} \dot{I}_m = -j \frac{1}{\omega_0 C R} U_m = \frac{\rho}{R} U_m e^{-j\frac{\pi}{2}}. \quad (10)$$

При резонансе суммарная энергия контура постоянна. Индуктивный и емкостный элементы лишь обмениваются энергией между собой: при максимальном значении энергии, накопленной в индуктивности, значения энергии на конденсаторе равно нулю, и наоборот.

$$W_{\text{ср}} = W_{\text{ср}} = W_0. \quad (11)$$

Токи и напряжения между началами и концами отдельных фаз источника или приемника называются **фазными**.

Токи и напряжения между началами фаз источника или приемника либо между линейными проводами называются **линейными**.

При анализе соотношений фазных и линейных напряжений не учитываются падения напряжения во внутренних сопротивлениях источника энергии и падения напряжения в сопротивлениях проводов электрических сетей. По второму закону Кирхгофа применительно к рисунку 3а получаем:

$$U_p = E_p, \quad U_s = E_s, \quad U_c = E_c. \quad (1)$$

В генераторе с симметричной системой ЗДС симметричны и фазные напряжения.

В общем виде линейные и фазные напряжения соотносятся как:

$$U_s = \sqrt{3} U_p. \quad (2)$$

Теперь рассмотрим соединение треугольником (рис. 9б). Для него также выполняются соотношения (1), и наблюдается равенство линейных и фазных напряжений:

$$U_m = U_s, \quad U_m = U_p, \quad U_m = U_c.$$

Соотношение фазных и линейных напряжений при соединении треугольником имеет вид:

$$U_s = U_p. \quad (3)$$

части электрической цепи подключаются к узловым точкам (они также могут быть соединены треугольником либо звездой).

Соединение звездой — это соединение, при котором концы трех фаз соединяются в одной точке, называемой нейтральной точкой N.

Нейтральный провод — это провод, соединяющий нейтральные точки источника и приемника энергии.

Если в соединениях треугольником или звездой используют нейтральный провод, то электрическая цепь с таким соединением называется **четырёхпроводной**; если же нейтральный провод в соединении отсутствует, цепь называют **трехпроводной**.

Токи и напряжения между началами и концами отдельных фаз источника или приемника называются **фазными**.

Токи и напряжения между началами фаз источника или приемника либо между линейными проводами называются **линейными**.

Для расчета трехфазных электрических цепей, как и для цепей sinusoidalного и постоянного тока, применяются законы Кирхгофа.

Для решения уравнений, составленных по законам Кирхгофа, большое значение имеют знаки ЗДС, токов и напряжений.

Первоначально выбирают условно-положительное направление ЗДС, которым является направление от конца к началу фазы. Затем сонаправленно ЗДС указывают положительные направления фазных токов, а направления фазных напряжений указывают в противоположную сторону.

21 СОЕДИНЕНИЯ ПРИЕМНИКОВ ЗВЕЗДОЙ

Соединение звездой — это соединение, при котором концы трех фаз соединяются в одной точке, называемой **нейтральной точкой N**.

Нейтральный провод — это провод, соединяющий нейтральные точки источника и приемника энергии. Токи и напряжения между началами и концами отдельных фаз источника или приемника называются **фазными**. Токи и напряжения между началами фаз источника или приемника либо между линейными проводами называются **линейными**. Фазные и линейные токи при соединении звездой соотносятся в соответствии со следующим уравнением:

$$I_{\phi} = I_L$$

Ток в нейтральном проводе определяем, воспользовавшись первым законом Кирхгофа:

$$I_A + I_B + I_C = I_N$$

Трехфазные электрические цепи могут быть нагружены как симметрично, так и несимметрично.

Симметричная нагрузка — нагрузка, для которой характерно равенство во всех фазах активных и реактивных сопротивлений.

$$r_A = r_B = r_C; \quad x_A = x_B = x_C; \quad Z_A = Z_B = Z_C$$

Для трехфазной цепи с нейтральным проводом симметричная нагрузка характеризуется следующими равенствами:

$$I_A = I_B = I_C = I_{\phi}; \quad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi_{\phi}; \quad P_A = P_B; \quad P_T = P_{\phi}$$

22 СОЕДИНЕНИЯ ПРИЕМНИКОВ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Соединение треугольником — это соединение, в котором выводы трех элементов последовательно соединены между собой (вывод первого с выводом второго, второго — с третьим, а третьего — с первым).

Фазные напряжения приемника при соединении треугольником равны соответствующим значениям линейных напряжений.

$$U_{\phi} = U_L \quad (1)$$

Токи в фазах цепи отличаются от токов линейных этой же цепи:

$$I_{\phi} = I_{\phi} - I_{\phi}; \quad I_{\phi} = I_{\phi} - I_{\phi}; \quad I_{\phi} = I_{\phi} - I_{\phi} \quad (2)$$

Трехфазные электрические цепи могут быть нагружены как симметрично, так и несимметрично. **Симметричная нагрузка** — нагрузка, для которой характерно равенство во всех фазах активных и реактивных сопротивлений.

Несимметричная нагрузка — нагрузка, при которой сопротивление хотя бы одной из фаз не равно сопротивлениям других фаз.

Соединение треугольником характеризуется различными значениями фазных токов, углов сдвига фаз и фазных мощностей.

Мощности фаз определяются по формулам:

$$P = P_{\phi} + P_{\phi} + P_{\phi}$$

$$Q = Q_{\phi} + Q_{\phi} + Q_{\phi}$$

23 УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВ

Для описания магнитного поля используют такие показатели, как магнитный поток, магнитная индукция, напряженность магнитного поля, намагниченность, магнитная проницаемость, магнитное воздействие.

Электродвигатели, электромагниты, различные электроизмерительные приборы основаны на принципе силового действия магнитного поля.

Электромагнитные устройства, использующие либо индукционное, либо силовое действие магнитного поля, называются **электромагнитными**.

Магнитное поле устройства имеет в каждом отдельном случае определенную интенсивность и направленность действия. Для обеспечения указанных условия используются определенные магнитные системы, которые включают в себя магнитопроводы и намагничивающие обмотки (одну или несколько).

В магнитопроводах часто используются воздушные зазоры, которые, увеличиваясь, уменьшают величину индуктивности катушки; также воздушный зазор способствует снижению насыщения магнитопровода. Примером применения электромагнитных устройств с воздушным зазором в магнитопроводах может быть индуктивный сглаживающий фильтр источников электропитания.

Намагничивающие обмотки либо постоянные магниты возбуждают магнитное поле в пространстве, происходит намагничивание ферромагнитного материала магнитопроводов. Значение

24 ПОНЯТИЕ О ДВУХТАКТНЫХ И ТРЕХТАКТНЫХ МАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Магнитная цепь **постоянной и переменной МДС** — цепь, магнитный поток которой возбуждается обмотками, одни из которых питаются постоянным током, а некоторые — переменным.

Ферромагнитный магнитопровод, включенный в магнитную цепь, можно представить в виде элемента только с индуктивным сопротивлением. Данное индуктивное сопротивление регулируется длиной воздушного зазора. Зазоры, увеличиваясь, уменьшают величину индуктивности катушки, а также способствуют снижению насыщения магнитопровода. Примером применения электромагнитных устройств с воздушным зазором в магнитопроводах может быть индуктивный сглаживающий фильтр источников электропитания.

Воздушные зазоры — это эффективный способ регулирования тока, напряжения и мощности приемника, однако их применение значительно усложняет конструкции, что повышает стоимость и усложняет процесс производства.

Обмотка с ферромагнитным магнитопроводом, в которой сопротивление изменяется подмагничиванием магнитопровода постоянным током, называется **дресселем насыщения**.

Дроссели насыщения, которые предназначены для усиления сигналов и учитывают линейность характеристики управления, быстродействия и другие характеристики усилителей, называют **магнитными усилителями**.

Для подсчета фазных мощностей, как и для линейных токов, применяют также и комплексный метод.

$$S_{\text{ф}} = U_{\text{ф}} I_{\text{ф}};$$

$$P_{\text{ф}} = \text{Re} S_{\text{ф}};$$

$$Q_{\text{ф}} = \text{Im} S_{\text{ф}};$$

$$S_{\text{л}} = \sqrt{P_{\text{л}}^2 + Q_{\text{л}}^2}.$$

Если изменить сопротивление приемников, то произойдет соответствующее изменение других величин электрической цепи. Рассмотрим такой пример:

$$X_{\text{св}} / r_{\text{св}} = \text{const}.$$

Увеличим сопротивление $Z_{\text{св}}$ в два раза.

В этом случае произойдет изменение тока $I_{\text{св}}$ — его значение уменьшится, а величина угла $\varphi_{\text{св}}$ останется постоянной.

$$Q_{\text{с}} = Q_{\text{с}} = Q_{\text{с}} = Q_{\text{с}}; S_{\text{с}} = S_{\text{с}} = S_{\text{с}} = S_{\text{с}}.$$

Таким образом, использование нейтрального провода при симметричной нагрузке нецелесообразно.

Мощность в трехфазных приемниках равна:

$$P = 3P_{\text{ф}} = 3U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \cos \varphi_{\text{ф}}; Q = 3Q_{\text{ф}} = 3U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \sin \varphi_{\text{ф}};$$

$$S = 3S_{\text{ф}} = 3U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} = 3\sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Линейные напряжения и токи в трехфазных приемниках являются номинальными, тогда:

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi_{\text{л}}; Q = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi_{\text{л}};$$

$$S = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}}.$$

Несимметричная нагрузка — нагрузка, при которой сопротивления хотя бы одной из фаз не равно сопротивлениям других фаз. При несимметричной нагрузке необходимо использовать нейтральный провод. Мощность в цепи при несимметричной нагрузке определяется:

$$P = P_{\text{а}} + P_{\text{б}} + P_{\text{в}}; Q = Q_{\text{а}} + Q_{\text{б}} + Q_{\text{в}}.$$

Ток в нейтральном проводе при несимметричной нагрузке определяется комплексным методом. В комплексной форме мощность определяется по следующим формулам:

$$S = UI, P = \text{Re } S, Q = \text{Im } S, S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Магнитные усилители можно произвести для любого значения мощности, их можно использовать как угодно долго, характеризуются высокой надежностью, выдерживают перегрузки, уменьшают трудоемкость работы, могут одновременно усиливать два и более сигнала. В связи с этим магнитные усилители используются чаще, чем электронные усилители.

В состав магнитных усилителей включены два ферромагнитных магнитопровода. На одном из магнитопроводов находится рабочая обмотка, на другом — обмотка управления. Рабочая обмотка подсоединена к источнику переменного тока, обмотка управления — к источнику постоянного тока. В цепи при этом переменный ток может иметь слишком высокое значение, в связи с чем используют встречное включение обмоток управления.

В магнитных усилителях используются магнитопроводы различной формы: прямоугольной, круглой, овальной.

Бывают случаи, когда необходимо при изменении направления тока усилителя одновременно изменять направление тока приемника постоянного тока или же изменить фазу тока приемника переменного тока. На практике для достижения указанных целей широкое применение получили **двухтактные магнитные устройства (МУ)**.

В двухтактных усилителях используется внутренняя обратная связь, что значительно увеличивает коэффициент усиления.

В трехфазных приемниках применяются **трехфазные МУ**, которые можно заменить тремя однофазными МУ.

магнитного поля магнитопроводов постепенно превышает значение магнитного поля среды, окружающей магнитопровод. Это условие позволяет магнитное поле сконцентрировать там, где это необходимо, регулируя конфигурацию определенным образом. С помощью магнитного поля в цепях возможно регулирование значений тока, мощности, габаритных размеров, а также массы намагничивающих обмоток. Так, увеличивая значение магнитного поля, указанные показатели уменьшаются. Рассмотрим классификацию магнитных цепей. Магнитные цепи бывают с намагничивающими обмотками и постоянными магнитами, неразветвленные и разветвленные, с одной или более намагничивающими обмотками, симметричные и несимметричные, с однородными и неоднородными магнитопроводами.

Симметричная магнитная цепь — цепь, ветви которой, расположенные по обе стороны от линии, проведенной через узловые точки разветвления потоков, выполнены из одинаковых материалов и имеют одинаковые геометрические размеры. Также условием симметричности магнитных цепей является равенство магнитодвижущих сил указанных ветвей. В противном случае цепь является несимметричной.

Однородный магнитопровод — провод, выполненный по всей длине из одного и того же ферромагнитного материала, а также имеет одинаковую площадь поперечного сечения.

Цепи с постоянной Магнитодвижущей силой (МДС) — это цепи, магнитный поток которых возбуждается намагничивающими обмотками, питаемыми постоянным током, либо постоянными магнитами.

25 МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИСТЕМЫ

В основе принципа действия **магнитоэлектрических систем** лежит взаимодействие магнитных полей между постоянным магнитом и обмоткой с током.

В качестве электроизмерительного прибора с магнитоэлектрической системой рассмотрим устройство, состоящее из неподвижного стального цилиндра и постоянного магнита, между которыми находится алюминиевая рамка с обмоткой.

Алюминиевая рамка подсоединена к двум полусоясам, на одной из которых расположены указательная стрелка и пара спиральных пружин. Через эти пружины измеряемый ток вместе с противовесами проводится к катушке. За счет взаимодействия магнитных полей и тока возникает вращающий момент, вызывающий поворот подвижной части механизма (рамки), а следовательно, и стрелки.

$$F_{\text{эм}} = wBi,$$

где $F_{\text{эм}}$ — электромагнитная сила, действующая на обмотку;

l — длина рамки;

w — число витков обмотки;

B — магнитная индукция.

$$M_{\text{вр}} = F_{\text{эм}}d = wBiId = C_1 I,$$

где C_1 — коэффициент, равный произведению $wBiId$.

26 ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Электрические приборы и устройства, как и все приборы в целом, могут выходить из строя, также могут изменяться и некоторые характеристики приборов. Поэтому необходимо применять методы контроля за работой электрооборудования. К таким средствам измерения относятся амперметры, вольтметры, ваттметры и др. При работе электроприборов и устройств контролируются также величины, как ток, напряжение, мощность, коэффициент мощности, частота и т.д.

Помимо подвижной части, в измерительных механизмах устанавливаются успокоители — **демпферы**. Они используются для исключения колебаний подвижной части, связанных с изменениями измеряемой величины.

Электроизмерительные приборы разделяются на магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, индукционные и т.д.

Электродинамические системы включают в себя две обмотки, одна из которых подвижная, а другая неподвижная. В основе принципа действия данной системы лежит взаимодействие магнитного потока неподвижной обмотки с током подвижной обмотки.

Подвижная обмотка находится в неподвижной. Стрелка прибора крепится к оси подвижной обмотки. Здесь же располагаются и пружины, за счет действия которых в приборе возникает противодействующий момент. Противодействующий момент, как и в магнитоэлектрической и

27 ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Погрешности бывают **случайными, систематическими и грубыми**.

По причине возникновения систематические погрешности измерения подразделяются на:

- 1) инструментальные (погрешности, которые зависят от погрешностей средств измерения);
- 2) методические (возникают из-за несовершенства метода измерения);
- 3) субъективные (зависят от индивидуальных особенностей человека, производящего измерение).

Систематические погрешности всегда постоянны, изменяются при нескольких измерениях одной и той же величины по определенному закону.

Грубая погрешность — это погрешность, сильно превышающая ожидаемую погрешность и искажающая результат измерения. Ее можно исключить из результатов измерения.

Применительно к электрическим цепям факторами, вызывающими погрешности измерений, могут быть изменение температуры, воздействие внешних магнитных и электрических полей, силы трения в измерительных механизмах и т.п.

Погрешности измерений также подразделяются на абсолютные и относительные.

Абсолютная погрешность — это разность между измеренным и действительным значением контролируемой величины.

28 ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА

В электротехнике также существуют меры (например, мера тока, мера напряжения, мера мощности и т.д.). Так, для установления меры тока применяются токовые весы, которые определяют силу взаимодействия между двумя катушками с током, включенными последовательно. 1А — значение, соответствующее уравновешенному положению весов.

Мера ЭДС определяется через ЭДС нормального элемента, величина которой является постоянной и составляет при 20 °C 1,0185 — 1,0187 В.

Мерой индуктивности является образцовая катушка. Она также изготавливается на определенные значения индуктивности (0,0001—1 Гн).

Образцовые конденсаторы выступают в роли емкостных мер. Эти конденсаторы состоят из плоских или же цилиндрических пластин, между которыми располагается воздушная или слюдяная изоляция.

В качестве методов измерения электрических величин выступают методы прямые и косвенные, а также метод сравнения.

Прямой метод измерения основан на непосредственном определении значения какой-либо величины прямым снятием показаний с измерительных приборов. Например, таким методом можно определить значение тока с помощью амперметра.

Косвенные методы заключаются в определении контролируемой величины расчетным путем через снятие показаний других величин. Например, для определения коэффициента мощнос-

электромагнитной системы, пропорционален углу закручивания.

На подвижную обмотку электродинамической системы действует вращающий момент, равный:

$$M_{\text{в}} = C' \Phi i_2 = C' I_2 i_1,$$

где C' и C'' — коэффициенты пропорциональности.

В случае, когда электродинамическая система применяется в цепи переменного тока, вращающий момент равен:

$$M_{\text{в}} = \frac{1}{T} \int_0^T C' I_2 i_1 dt = C' I_2 \cos \varphi,$$

где i_1, i_2 — угол сдвига фаз между векторами токов;

φ — угол сдвига фаз между векторами токов.

$$i_1 = I_{1\text{м}} \sin \omega t; \quad i_2 = I_{2\text{м}} \sin(\omega t + \varphi).$$

При условии $M_{\text{в}} = M_{\text{п}}$ стрелка прибора занимает положение на шкале, соответствующее значению измеряемой величины.

Электродинамическими приборами измеряются мощность, напряжение и ток в цепях переменного тока. Эти приборы имеют ряд достоинств, таких как высокая точность измерений, возможность их применения для измерений в цепях постоянного и переменного тока.

Спиральные пружины в механизме применяются для создания противодействия:

$$M_{\text{п}} = C_2 \alpha,$$

где C_2 — коэффициент, зависящий от жесткости пружин;

α — угол закручивания.

При условии $M_{\text{в}} = M_{\text{п}}$ стрелка прибора занимает положение на шкале, соответствующее значению измеряемой величины. Тогда:

$$\alpha = \frac{C_1}{C_2} I = C I.$$

В основе принципа действия электромагнитной системы лежит втягивание стального сердечника в неподвижную обмотку с током. Импульсный прибор включает неподвижную обмотку и электрическую цепь; в качестве подвижного элемента применяется стальной сердечник, выполненный в форме лепестка. Подвижная часть электромагнитной системы закреплена на оси со стрелкой; для обеспечения противодействия применяются пружина и поршень успокоителя.

$$M_{\text{в}} = C I^2.$$

Шкала приборов электромагнитной системы неравномерна в силу того, что угол закручивания находится в квадратичной зависимости от тока.

ти сначала измеряются значения мощности, тока и напряжения.

Метод сравнения основан на сравнении контролируемой измеряемой величины с некоторой известной физической величиной. Например, измеряют сопротивление, используя четырехплечную мостовую схему (мостовой метод сравнения).

Средством измерения тока является амперметр, который включается в цепь последовательно. Для измерения тока в цепи постоянного тока в средства измерения применяются магнитоэлектрические и электромагнитные системы; для измерения тока в цепях переменного тока — электромагнитные системы.

Сопротивление амперметра, используемого для измерения, должно быть в 2 раза меньше сопротивлений элементов цепи, в которой производится измерение.

В устройстве амперметра часто включают шунты-резисторы, с помощью которых предел измерения прибора увеличивается. Шунты-резисторы включают в цепь параллельно амперметру.

$$I_{\text{с}}(I_{\text{ном}} - I_{\text{сш}}) = I_{\text{сш}} I_{\text{сш}}$$

где $I_{\text{сш}}$ — наибольшее значение тока в цепи; $I_{\text{ном}}$ — предельное значение тока прибора без шунта.

Ток в цепи определяют соотношением:

$$\frac{I}{I_{\text{с}} - I_{\text{сш}}} = \frac{I_{\text{с}} + I_{\text{сш}}}{I_{\text{с}}} = K.$$

$$\Delta A = A_{\text{из}} - A_{\text{д}}$$

где $A_{\text{из}}$ — измеренное значение;

$A_{\text{д}}$ — действительное значение контролируемой величины.

Однако с помощью абсолютной погрешности сложно судить о точности произведенного измерения. Степень точности измерения более эффективно оценивается относительной погрешностью.

Относительная погрешность — это отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины. Она выражается в процентах.

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_{\text{д}}} 100\%.$$

Когда подбирается необходимое средство измерения, внимание уделяется метрологическим показателям, особенностям конструкции, экономическим показателями и т. д. Электроизмерительные приборы, такие как амперметры, ваттметры и вольтметры, имеют восемь классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. На основе значения класса точности рассчитывается наибольшее значение погрешности прибора:

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{\Delta A}{A_{\text{ном}}} 100\%.$$

На значение относительной погрешности большое влияние оказывает действительное значение измеряемой величины. Уменьшение действительной величины приводит к увеличению значения погрешности.

29 ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

В результате измерений мы всегда получаем какую-либо величину, выраженную соответствующими единицами измерения. Судить о том, большая это величина или маленькая, достаточная в данной ситуации или нет, помогает сравнение ее с некоторым эталоном меры данной величины.

Эти эталоны мер находятся в определенном месте, где следят за обеспечением оптимальных условий их хранения.

В электротехнике существует мера напряжения, мера тока, мера мощности и т.д. Так, в качестве меры сопротивления выступают образцовые резисторы, которые изготавливаются с определенными значениями от 0,00001 до 100 000 Ом.

Различают следующие методы измерения электрических величин: **прямые** и **косвенные**, а также **метод сравнения**.

Прямой метод измерения — непосредственное определение значения электрической величины прямым снятием показаний с измерительных приборов. Например, таким методом можно определить значение сопротивления с помощью резистора.

Косвенные методы — это вычисление контролируемой величины через снятие показаний приборов для определения других величин. Например, для определения напряжения сначала измеряют значения силы тока и сопротивления.

Метод сравнения — сравнение контролируемой измеренной величины с некоторой известной физической величиной. Например, измерение напряжения, результат которого сопоставляют

30 ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ

Электрические приборы и устройства, как и все приборы в целом, могут выходить из строя, также могут изменяться и некоторые характеристики приборов. Поэтому необходимо применять методы контроля за работой электрооборудования.

К таким средствам измерения относятся амперметры, вольтметры, ваттметры и др. При работе электроприборов и устройств контролируются такие величины, как ток, напряжение, мощность, коэффициент мощности, частота и т.д.

Измерительный механизм включает подвижную часть. Принцип действия механизма основан на взаимодействии этой подвижной части с указательным устройством. Магнитные поля прибора, взаимодействуя между собой, вызывают перемещение подвижной части за счет возникающего вращающего момента. Этот вращающий момент непосредственно зависит от измеряемой величины.

Вращающий момент уравновешивается противодействующим моментом, создаваемым с помощью применения некоторых механических элементов (например, пружин).

Помимо подвижной части, в измерительных механизмах устанавливаются успокоители — демпферы. Они используются для исключения колебаний подвижной части, связанных с изменениями измеряемой величины.

Электроизмерительные приборы разделяются на **магнитоэлектрические**, **электромагнитные**, **электродинамические**, **индукционные** и т.д.

31 ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Сопротивления цепи измеряются амперметрами и вольтметрами, а также омметрами и мостовыми приборами.

Вольтметры и амперметры подключают в цепь в зависимости от значения измеряемого сопротивления. Для измерения сопротивлений средних и больших размеров подключение в цепь осуществляется по схеме на рисунке 10а; для измерения сопротивлений малых значений — по схеме на рисунке 10б.

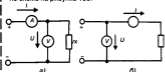


Рис. 10. Схемы измерения сопротивлений с помощью амперметров и вольтметров

Проведя соответствующие измерения, величину сопротивления определяют следующим образом:

$$R_x = \frac{U}{I}. \quad (1)$$

Метод измерения сопротивлений амперметром в сочетании с вольтметром является косвенным. Существует также и прямой метод из-

32 ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

Электронно-лучевой осциллограф позволяет измерять параметры и форму электрических сигналов, а также наблюдать их форму визуально. Осциллографом производится измерение электрических сигналов с частотой до нескольких мегагерц. Электронно-лучевые осциллографы характеризуются высокой чувствительностью и небольшой инерционностью. Они бывают универсальными, специальными, запоминающими, однолучевыми, двухлучевыми, многолучевыми и т.д.

Визуальное изображение электрического луча получается с помощью преобразования в вакуумной электронно-лучевой трубке (ЭЛТ). Электронный луч образуется свободными электронами, которые формируются на катоде с помощью разогрева нитью накала.

Яркость визуального изображения контролируется изменением отрицательного потенциала электрода, так как такое изменение оказывает влияние на значение тока электронного луча.

Изображение электрического сигнала представляет собой функцию времени. Имеются также три канала управления лучом ЭЛТ (x, y, z). Каждый из каналов выполняет определенную задачу, выполнение которых в совокупности дает полное изображение электрического сигнала на экране. Так, канал x отвечает за контроль отклонения луча по горизонтальной оси времени, канал y — за контроль отклонения луча по оси y; канал z контролирует яркость луча.

Средствами измерения мощности в электрических цепях однофазного и постоянного тока являются ваттметры с устройством в виде электродинамической системы. В таких устройствах имеются две обмотки: подвижная, или обмотка напряжения, и неподвижная, или токовая.

Напряжение подвижной обмотки должно совпадать по фазе с напряжением цепи.

Также в указанных устройствах наблюдается равенство тока неподвижной обмотки и тока нагрузки.

$$M_{\text{в}} = CU \cos \varphi = CP, \quad (1)$$

где C — коэффициент пропорциональности.

У ваттметров имеются два генераторных вывода, один из которых принадлежит токовой обмотке, а другой — обмотке напряжения. На схемах их помечают звездочками, и включаются в цепь они в той стороне, где расположен источник питания.

В цепях трехфазного тока в качестве измерительных приборов применяются те же ваттметры, но схемы их включения различаются. Для измерения может быть использовано от одного и более ваттметров.

Мощность потребителя в этом случае определяется:

$$P = 3W, \quad (2)$$

где W — показание ваттметра.

Формула (2) справедлива для случая симметричной нагрузки (используется один ваттметр). Для случая несимметричной нагрузки имеем (используется три ваттметра):

$$P = W_1 + W_2 + W_3.$$

Электронный луч перемещается равномерно по горизонтальной оси, что задает линейный масштаб. В случае, когда напряжение задается только на горизонтально отклоняющие пластины, на экране мы видим только горизонтальную линию. Когда напряжение задается и на горизонтальные, и на вертикальные отклоняющие пластины, на экране мы видим осциллограмму, с которой можно снять все необходимые данные (форму, амплитуду и частоту напряжения).

$$T_x = nT_p \quad (1)$$

Формула (1) является условием устойчивого изображения. Здесь:

T_p — период напряжения развертки;

T_x — период исследуемого напряжения;

$n = 1, 2, 3 \dots$

Для выполнения условия (1) в электронно-лучевых осциллографах применяют устройства синхронизации, с помощью которых частота генератора развертки настраивается на частоту искомого напряжения. Выделяется **внутренняя синхронизация** — настройка происходит с помощью искомого сигнала; и **внешняя синхронизация** — при настройке используется любой сигнал, кроме искомого.

Так как канал у выполняет роль усилителя, он может оказать влияние на режим работы ЗЦ. Для исключения подобного влияния в состав электронно-лучевого осциллографа включен катодный повторитель с большим значением входного сопротивления. Также в устройство входит аттенуатор, создающий оптимальное напряжение на выходе канала; и линия задержки, исследующая фронт импульса напряжений.

ся с известным значением ЭДС нормального элемента (компенсационный метод сравнения).

В качестве средства измерения напряжения в цепи выступают вольтметры. Вольтметр при измерениях подключается к выводам элементов.

В отличие от случая с амперметром вольтметр должен иметь сопротивление, большее сопротивления измеряемого элемента цепи в 2 раза. Это условие обеспечивает снижение погрешности измерений. В устройство вольтметров иногда включают применение добавочных резисторов (в цепях с $U \leq 500$ В), расширяющих пределы измерения приборов.

Сопротивление добавочного резистора определяется по формуле:

$$r_d = r_s \frac{U_{\text{ном}} - U_{\text{в}}}{U_{\text{в}}},$$

где $U_{\text{ном}}$ — максимальное значение измеряемого напряжения;

$U_{\text{в}}$ — предельное значение напряжения прибора без добавочного резистора.

Напряжение выражается из соотношения:

$$\frac{U}{U_{\text{в}}} = \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{в}}} = \frac{r_s + r_d}{r_s} = k; U = kU_{\text{в}}.$$

где $U_{\text{в}}$ — показание вольтметра.

мерения, который заключается в применении для измерения омметра.

Устройство омметра включает в себя магнитоэлектрический миллиамперметр, добавочный резистор r и источник энергии. Если ЭДС источника энергии имеет постоянное значение, то на показания прибора оказывается влияние только величина r . Так в цепи определяется по формуле:

$$I_x = \frac{E}{(r_s + r_d + r_x) + r},$$

Логометр включает в себя две подвижные обмотки, жестко связанные друг с другом. В этом устройстве не создается противодействующий момент, а равновесие подвижной системы создается через определенное соотношение токов обмоток.

Если необходимо измерить большие значения сопротивлений, применяют мегаомметры. Наиболее точные результаты измерений дают мостовые приборы. Искомая величина сопротивления определяется по формуле:

$$r_x = r_2 r_3 / r_1 \quad (3)$$

Значения индуктивных и емкостных элементов измеряются уравновешенными мостами переменного тока. Условие равновесия имеет вид:

$$L_1 Z_1 = L_2 Z_2, \quad L_1 Z_2 = L_2 Z_1. \quad (4)$$

Трансформатор — это статическое электромагнитное устройство, имеющее две и большее число индуктивно связанных обмоток, предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

В устройство трансформатора входят ферромагнитный магнитопровод, состоящий из нескольких листов электротехнической стали; первичная и вторичная обмотки (w_1 , w_2).

Принцип действия трансформатора основан на явлении взаимной индукции, которая заключается в преобразовании параметров первичной цепи с параметрами U_1 , I_1 в параметры вторичной цепи U_2 , I_2 . При этом выполняются следующие соотношения:

$$e_1 = -w_1 d\Phi / dt; e_2 = -w_2 d\Phi / dt. \quad (1)$$

Тогда:

$$E_1 = 4,44 w_1 f \Phi_m; E_2 = 4,44 w_2 f \Phi_m$$

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k \quad (2)$$

где k — коэффициент трансформации трансформатора.

Помимо основного магнитного потока в ферромагнитном сердечнике первичной обмотки, ее током образуется и магнитный поток рассея-

Магнитопроводы каждого из трансформатора объединяются в один, называемый **трех-стерженным**.

Трехфазные трансформаторы могут быть с независимыми и со свободными магнитными цепями фаз. Трехфазный трансформатор, в состав которого входит три однофазных трансформатора, относится к группе с независимыми цепями фаз. Их очень удобно монтировать и, следовательно, транспортировать; их используют в условиях больших мощностей.

Если у группы однофазных трансформаторов имеется один общий ферромагнитный сердечник, то трансформатор относится к классу со свободными магнитными цепями фаз. Достоинствами таких трансформаторов являются малые габариты, небольшая масса и малые потери в стали, а к недостаткам относится сложность изготовления.

Трехфазные трансформаторы условно заменяют схемой однофазного, и для этой схемы осуществляют все необходимые расчеты.

У первичных обмоток начала и концы обозначают заглавными буквами латинского алфавита (AX, BY, CZ). Во вторичных обмотках обозначения производятся строчными буквами латинского алфавита (ax, by, cz). В обеих обмотках может встретиться соединение фаз как звездой, так и треугольником.

В промышленности наиболее распространены значения используемых напряжений в 220, 380 и 500 В. Эти значения получаются с помощью применения трансформаторов, преоб-

Потери мощности в трансформаторах могут происходить в магнитопроводах, а также в обмотках.

Значения потерь мощности в обмотках трансформатора определяются формулой:

$$\Delta P_w = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 = I_1^2 r_{\Sigma}$$

Для магнитопровода это значение равно:

$$\Delta P_{\Sigma} = G B_m^2 \Delta P_{15} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5};$$

$$n = 5,69 \lg \frac{\Delta P_{15}}{\Delta P_{10}}$$

где G — масса магнитопровода, кг;

B_m — амплитуда магнитной индукции, Тл;

ΔP_{10} — удельные потери в стали, Вт/кг, при

$B_m = 1$ Тл и $f = 50$ Гц; ΔP_{15} — удельные потери

в стали, Вт/кг, при $B_m = 1$ Тл и $f = 50$ Гц;

f — частота тока в обмотках, Гц.

Величина нагрузки является определяющей при потерях в обмотках трансформаторов, но не оказывает влияния на потери в магнитопрово-

Электрические машины постоянного тока могут применяться как генераторы либо как двигатели. Если машина работает в режиме генератора, в ней производится преобразование механической энергии в электрическую энергию постоянного напряжения и тока. При работе в режиме двигателя машина осуществляет преобразования, обратные указанным, т.е. электрическая энергия переходит в механическую.

Двигатели постоянного тока имеют ряд достоинств: обеспечивают плавность регулирования частоты вращения якоря, имеют улучшенные пусковые качества, а именно: большой пусковой момент при малом значении тока.

Применение электродвигателей постоянного тока реализуется и в приводных двигателях прокатных станов, гребных винтов кораблей, а также шахтных подъемных машин, в городском, заводском и магистральном электрифицированном транспорте; подобные двигатели используются и в дорожно-строительных и ремонтно-отделочных машинах и т.д.

Генераторы постоянного тока используются как источники питания электролитических ванн, для зарядки аккумуляторных батарей и при осуществлении высококачественной сварки. Также с помощью генераторов постоянного тока усиливают электрические сигналы управления систем автоматического регулирования. Генераторы, регулирующие частоту вращения, носят название **тахогенераторов**.

зующей электрическую энергию высокого напряжения до необходимых значений. Можно установить трансформаторы отдельно для каждого цеха. При этом возникает необходимость в целях сокращения затрат на их установку уменьшить длину проводов низковольтных сетей. Также необходимо обеспечить бесперебойное снабжение электроэнергией приемников, так как при эксплуатации один из трансформаторов может выйти из строя, и какой-либо цех или предприятие в целом остановят производство. Для достижения поставленных целей в промышленности применяется установка нескольких параллельно соединенных между собой трансформаторов.

При этом, если один из них теряет свою работоспособность, приемники все равно продолжают снабжаться электроэнергией. Однако здесь необходимо исключить возможность возникновения в обмотках трансформаторов уравнительных токов при холостом ходе. Это обеспечивается равенством по модулю линейных напряжений обмоток, а вторичные линейные напряжения должны совпадать по фазе:

$$U_{\text{акт}0} = U_{\text{акт}1}, I_{\text{пр}} = 0. \quad (1)$$

Условие (1) справедливо в случае одинакового соединения первичных и вторичных обмоток, а их схемы соединены звездой либо треугольником. Нагрузка между трансформаторами распределяется пропорционально их номинальным мощностям в случае, когда у трансформаторов равны значения напряжений короткого замыкания.

В устройстве машины постоянного тока выделяются следующие части:

- 1) неподвижная часть — статор; создает магнитный поток;
- 2) вращающаяся часть — якорь; преобразует механическую энергию в электрическую, и наоборот.

Якорь — цилиндрическое тело, включающее вал и вращающееся в пространстве между полюсами статора. Его частями являются: зубчатый сердечник, коллектор и щетки.

Главный полюс представляет собой сердечник из листовой электротехнической стали, толщина которой составляет 0,5—1,0 мм. Со стороны якоря на сердечнике имеется полюсный наконечник. Он используется для облегчения прохождения магнитного потока в воздушном зазоре. Главный полюс крепится к станине с помощью специальных болтов.

В состав добавочных полюсов включены сердечник и катушка, надетая на сердечник. Сердечники изготавливаются из кованой стали либо литыми. Катушки характеризуются малым числом витков, а в качестве материала для их изготовления чаще всего применяют изолированную медную проволоку либо шины большого сечения. К станине крепятся главные и добавочные полюсы, а с помощью нее машину крепят к фундаменту. Материалом для изготовления станины чаще являются литая сталь или чугун. Иногда станина изготавливается с разъемом. С двух сторон к станине прикрепляются подшипниковые щиты для опоры вала якоря. Щеточная траверса прикрепляется либо на подшипниковых щитах, либо непосредственно на станине.

ния Φ , охватывающий витки только первичной обмотки. Поэтому напряжение первичной обмотки определяется:

$$U_1 = -E_1 - E_{\text{ст}} + I_1 r_1. \quad (3)$$

Как видно из соотношения (3), значения ЭДС E_1 и напряжения первичной обмотки различаются между собой на величину падения напряжения от ЭДС рассеяния и активного сопротивления обмотки.

Аналогично во вторичной обмотке током создается основной магнитный поток Φ , магнитный поток рассеяния $\Phi_{\text{ст}}$ и, следовательно, ЭДС E_2 . Тогда:

$$U_2 = E_2 + E_{\text{ст}} - I_2 r_2. \quad (4)$$

Различия напряжения и ЭДС часто пренебрегают. Тогда получаем с учетом указанных пренебрежений:

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2} = n \Rightarrow U_2 = U_1 \frac{w_2}{w_1} = \frac{U_1}{n}. \quad (5)$$

Коэффициент трансформации трансформатора выражается отношением напряжения первичной обмотки к напряжению вторичной обмотки.

Для значений токов соотношения вытекают из условия равенства мощностей обмоток:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2,$$

Тогда:

$$I_2 = I_1 n. \quad (6)$$

дах. КПД трансформаторов определяется формулой:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{ср}}},$$

где P_2 — отдаваемая трансформатором мощность;

P_1 — мощность, потребляемая трансформатором.

Как известно, полная мощность определяется формулой $P_1 = S_1 \cos \varphi_1$, тогда:

$$\eta = \frac{S_1 \cos \varphi_2}{S_1 \cos \varphi_1 + I_1^2 r_1 + \Delta P_{\text{ст}}}$$

или

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{ам}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ам}} \cos \varphi_1 + \Delta P_{\text{ст}} \beta^2 + \Delta P_{\text{ср}}},$$

где $\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{ам}} = I_{\text{ам}}^2 r_{\text{ст}}$ — потери мощности в обмотках при номинальной нагрузке;

$\Delta P_{\text{ср}}$ — потери мощности в магнитопроводе при номинальном напряжении.

Значения КПД до 98—99 % достигаются в трансформаторах большой мощности. Трансформаторам с малой мощностью соответствующие значения КПД около 82—80 %.

37 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРА И ДВИГАТЕЛЯ

Генератор — это электрическая машина постоянного тока, посредством которой производится преобразование механической энергии в электрическую.

Самый простой генератор представляет собой медный виток, который вращается равномерно в постоянном магнитном поле.

Рассмотрим случай, когда виток получает равномерное вращение от внешнего источника механической энергии. В постоянном магнитном поле по закону электромагнитной индукции возникает ЭДС. В случае, когда направление витка задано по часовой стрелке под северным магнитным полюсом, направление ЭДС идет в сторону от нас, а под южным магнитным полюсом — к нам. ЭДС витка при этом определяется как сумма значений ЭДС в каждом из полюсов:

$$E = e_1 + e_2$$

При условии, когда внешняя электрическая цепь замкнута, направление тока идет от нижней щетки к верхней, т.е. от положительного к отрицательному выводу. Если виток повернуть на 180° , то произойдет синхронная смена зон магнитных полюсов.

Если к щеткам генератора приложить внешнюю нагрузку $R_{\text{н}}$, то в обмотке якоря и в этой нагрузке появится ток I . Это приведет к появлению взаимодействия электромагнитных сил на активные стороны витков $F_{\text{акт}}$. При этом возникает противодействующий момент $M_{\text{пр}}$.

39 ЯВЛЕНИЕ КОММУТАЦИИ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Самая большая проблема в работе с машинами постоянного тока — коммутация. Этим, в частности, ограничивается максимальная мощность генераторов постоянного тока. Коммутация не позволяет также сильно повышать рабочие частоты вращения больших машин.

Коммутация машин постоянного тока — это процесс переключения секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую, сопровождающийся изменением направления тока в секциях.

Следствием изменения тока коммутирующей секции в ней образуется ЭДС самоиндукции в щетках обмоток должны быть шире, чем коллекторная пластина.

Это повышает механическую прочность щеток. В результате происходит одновременная коммутация нескольких секций, в каждой из которых образуется ЭДС взаимной индукции e , а также ЭДС от вращения секции в магнитном поле.

Возникающие таким образом ЭДС приводят к неоднородности плотности тока под щеткой. Это вызывает искрение под щеткой и, как следствие, потерю коллектором своей работоспособности.

При улучшении условий коммутации уменьшается искрение под щетками. Для этого применяются дополнительные полюсы.

В этом случае установление щеток производится на геометрическую нейтраль.

38 ЭДС ЯКОРА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Вращением обмоток якоря в магнитном поле создаются ЭДС на активных концах секций данной обмотки.

Для них:

$$e_{\text{ср}} = B_{\text{ср}} l v = \frac{\Phi}{l r} l v = \frac{v}{r} \Phi,$$

где $e_{\text{ср}}$ — среднее значение ЭДС стороны секции, проходящей в зоне одного полюса;

$B_{\text{ср}}$ — среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре одного полюса;

l — длина якоря или стороны секции обмотки якоря;

v — линейная скорость пересечения линий магнитного поля или вращения якоря;

r — полюсное деление;

Φ — магнитный поток одного полюса.

В случае, когда в составе обмотки выделяется N активных сторон секций, имеем:

$$E = e_{\text{ср}} \frac{N}{2a} = \frac{v \Phi}{r} \frac{N}{2a},$$

где $2a$ — число параллельных ветвей обмотки якоря.

40 КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО СПОСОБУ ВОЗБУЖДЕНИЯ. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ

Классификация генераторов постоянного тока производится по способу возбуждения, так как их свойства определяются такими параметрами, как число обмоток, способ подключения обмоток возбуждения. С учетом данного признака генераторы подразделяют на четыре группы:

- 1) генераторы независимого возбуждения (независимое подключение обмотки якоря и обмотки возбуждения к разным источникам энергии);
- 2) генераторы параллельного возбуждения (подключение обмотки возбуждения производится к щеткам, а источником энергии является ЭДС источника обмотки якоря);
- 3) генераторы последовательного возбуждения (обмотка якоря и обмотка возбуждения соединены последовательно);
- 4) генераторы смешанного возбуждения (сердечник имеет и последовательно, и параллельно соединенные обмотки).

Характеристика работы генераторов производится с помощью анализа таких параметров, как ток возбуждения $I_{\text{в}}$, вырабатываемая генератором мощность P , напряжение на зажимах U , ток якоря I и частота вращения n (n — величина постоянная). Все эти параметры взаимосвязаны между собой:

$$E = c_{\text{г}} l \Phi; \quad (1)$$

$$U = E - R_{\text{я}} I; \quad (2)$$

Так как $v = \pi D n / 60$ и $t = \pi D / 2r$ (D — диаметр якоря, n — частота вращения якоря, $2r$ — число пар полюсов), то:

$$E = \frac{\pi D}{60} n \frac{2r}{\pi D} \frac{N}{2\pi} \Phi = \frac{2pN}{602\pi} n \Phi,$$

где $\frac{2pN}{602\pi}$ — постоянная для каждой определенной машины величина, зависящая от конструктивных особенностей электрической машины постоянного тока.

Среднее значение электромагнитной силы для одной из сторон секции имеет вид:

$$F_{\text{ср}} = B_{\text{ср}} I_a l,$$

где I_a — ток активной стороны секции.

Для определения электромагнитного момента сторон секций воспользуемся формулой:

$$M = F_{\text{ср}} \frac{D}{2} N,$$

$$M = B_{\text{ср}} I_a \frac{D}{2} N = \frac{pN}{2\pi a} I_a \Phi,$$

$$M = c_M I_a \Phi,$$

где $c_M = \frac{pN}{2\pi a}$ — конструктивный коэффициент момента — постоянная для каждой определенной машины величина, зависящая от ее конструктивных параметров.

Уравнение (1) называют **уравнением ЭДС**, а уравнение (2) — **уравнением электрического состояния цепи якоря**.

Свойства генераторов определяются **характеристикой холостого хода (ХХХ)**, **внешней** и **регулировочной характеристиками**. Рассмотрим каждую из них подробнее.

С помощью ХХХ определяют, как зависит ЭДС генератора при холостом ходе от значения тока возбуждения. Частота вращения при этом постоянна.

$$E = f(I_a) \text{ при } I_a = 0, n = n_{\text{ном}} = \text{const.} \quad (3)$$

Внешней характеристикой описывают зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки. При этом постоянными остаются сопротивление цепи возбуждения и частота вращения.

$$U = f(I) \text{ при } R_{\text{я}} = \text{const; } n = n_{\text{ном}} = \text{const.} \quad (4)$$

Зависимость тока возбуждения от тока нагрузки описывают регулировочной характеристикой. В этом случае напряжение на выводах генератора необходимо поддерживать постоянным. Частота вращения также остается постоянной.

$$I_a = f(I) \text{ при } U = \text{const; } n = n_{\text{ном}} = \text{const.} \quad (5)$$

При постоянной скорости вращения якоря имеем:

$$M_{\text{в}} = M_{\text{пр}} = M.$$

При увеличении значения тока якоря необходимо затрачивать больше механической энергии на вращение якоря.

По второму закону Кирхгоффа:

$$E = IR_{\text{я}} + U_{\text{я}}$$

где $IR_{\text{я}}$ — напряжение на зажимах генератора, $U_{\text{я}}$ —

Тогда

$$U = E - IR_{\text{я}}$$

Уравнение баланса мощностей имеет вид:

$$UI = E - IR_{\text{я}}$$

Двигатель — это электрическая машина постоянного тока, в которой производится преобразование электрической энергии в механическую. Двигатель можно преобразовать в генератор, и наоборот.

Представим, что на щетки двигателя действует постоянное по значению напряжение U . Вследствие возникновения тока на активные стороны витка будут действовать электромагнитные силы $F_{\text{эм}}$. Направление этих сил определяют правилом левой руки. На стороны витка при этом действуют две разнонаправленные силы, образующие пару сил, а следовательно, вращающий момент витка $M_{\text{в}}$.

Таким способом создается магнитное поле, способствующее индуктированию ЭДС, с помощью которой компенсируются e_a , $e_{\text{м}}$, e_r .

Обмотка дополнительных полюсов включается последовательно с якорем.

Если возникают перегрузки машин постоянного тока, дополнительные полюсы насыщаются. Это приводит к ухудшению условий коммутации.

В зависимости от условий коммутации можно рассчитать ток, который будет являться наиболее допустимым для данной электрической машины постоянного тока:

$$I = (2 + 3) I_{\text{ном}},$$

где $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток машины.

При использовании дополнительных полюсов в генераторах необходимо, чтобы полярность этих полюсов была аналогична полярности главного полюса, за которым они и следуют по направлению вращения.

В двигателях полярность дополнительных полюсов должна соответствовать полярности главного полюса предшествующего по направлению вращения.

Двигатель запускается в движение реостатом, который подключается в цепь якоря двигателя. В начальный момент включения двигателя его параметры равны:

$$\text{Тогда: } I_a = 0; E = K_e \Phi n = 0,$$

$$I_{a, \text{п}} = U / (r_a + r). \quad (1)$$

Из формулы (1) мы видим, что без пускового реостата значение тока сильно возрастет. Это связано с тем, что сопротивление якоря оказывает малое воздействие на величину тока.

Если производить запуск двигателя без пускового реостата и использовать источник питания малой мощности, то напряжение сети уменьшится, и, следовательно, работа других потребителей ухудшится.

Уменьшения пускового тока и момента можно добиться увеличением частоты вращения якоря, приводящего к увеличению ЭДС.

При пуске двигателя выделяют искусственные электромагнитические и механические характеристики. Их количество определяется числом ступеней, на которые разбито полное сопротивление пускового реостата:

$$n_a = \frac{U}{K_e \Phi} \cdot \frac{I_a(r_a + r)}{K_e \Phi};$$

$$n_a = \frac{U}{K_e \Phi} \cdot \frac{M(r_a + r)}{K_e K_m \Phi^2}. \quad (2)$$

Выделяется несколько тормозных режимов работы электродвигателей:

- 1) режим противовключения;
- 2) генераторный режим с отдачей энергии в сеть;
- 3) режим динамического торможения.

В каждом из трех случаев электродвигатель работает в качестве генератора, преобразуя одного вида энергии в другой.

Режим противовключения — это режим, при котором якоря двигателя под действием внешнего момента либо запаса кинетической энергии вращается в направлении, противоположном току, в котором он должен был бы вращаться при данной схеме его включения в двигательном режиме.

При включении в цепь якоря пускового реостата с высоким значением сопротивления происходит переход двигателя на искусственную характеристику.

При этом разназывается момент M_p . Постепенно происходит уменьшение частоты вращения, а момент двигателя увеличивается. Когда частота вращения достигает нулевого значения, двигатель под действием момента M_p вращается в противоположную сторону, груз опускается.

$$I_a = \frac{U - E}{r_a + r} = \frac{U + |E|}{r_a + r} > 0.$$

При направлении момента противоположно частоте вращения, якорь вращается против

Как известно, посредством двигателей производится преобразование электрической энергии в механическую, а с помощью генераторов — механической в электрическую. Эти процессы преобразования энергии всегда происходят с определенными потерями энергии, а следовательно, и мощности. Коэффициент полезного действия зависит от мощности, т.е. потери мощности оказывают влияние на данный показатель. В результате потери мощности происходит процесс нагревания машин.

Потери мощности могут происходить:

- 1) в сопротивлениях цепи якоря — **переменные потери мощности**, влияние на значение этих потерь оказывает изменение нагрузки машины:

$$\Delta P_s = I_a^2 r_a; \quad (1)$$

- 2) в стали, ΔP_{σ} , эти потери возникают из-за вихревых токов и перемagnetизации магнитопровода якоря при вращении;

- 3) в результате трения в подшипниках, щетках о коллектор, либо трения о воздух частей с вращающимся движением. Эти потери называют **механическими потерями мощности**, $\Delta P_{\text{мех}}$;

- 4) в цепи параллельной или независимой обмотки возбуждения:

$$\Delta P_s = U_f I_f = I_f^2 r_f. \quad (2)$$

В устройстве асинхронных двигателей входит: станина с торцевыми щитами, материалом которых в основном является чугун; вал, на одном конце которого расположен вентилятор, закрытый кожухом. Кожух изготавливается из листовой стали. На станине крепится коробка выводов. С помощью вентилятора через жалюзи кожух засасывается воздух.

Высота оси вращения уменьшается путем редкого расположения ребер снизу станины по сравнению с остальной ее частью, а также эти ребра делают более короткими. В станине с помощью стальных винтов крепится сердечник статора, изготовленного из электротехнической стали 2013. Пазы сердечника закрываются полностью.

Также в устройстве выделяется всякая обмотка, материалом которой является крутой обмоточный провод с маркировкой ПЭТ-155 либо ПЭТ-155М. Следующий элемент — это сердечник ротора. Его изготавливают из электротехнической стали 2013 и заливают алюминием. Помимо заливки пазов, производят отлив закрывающих колец и вентиляционных лопаток. Закрывающие кольца применяются для крепления балансировочных грузов.

Если высота оси вращения составляет менее 250 мм, то сердечник ротора крепится на вал методом горячей посадки. Если высота оси больше, то целесообразнее при креплении ис-

двигательного режима, а режим работы двигателя соответствует режиму противосюключения.

При режиме противосюключения в электродвигателе происходит преобразование потенциальной энергии спускающегося груза в электрическую энергию, равную.

Генераторный режим с отдачей энергии в сеть — режим, при котором двигатель под действием внешнего момента или же запаса кинетической энергии вращается с частотой, большей частоты вращения холостого хода. Двигатель при этом вращается в направлении, совпадающим с направлением вращения в двигательном режиме.

В случае генераторного режима происходит совпадение направлений тока и ЭДС, т.е. электродвигатель выполняет роль генератора. Энергия $E_{\text{гд}}$, которая вырабатывается электродвигателем, передается в сеть постоянного тока, где часть ее переходит в теплоту в сопротивлениях якоря цепи.

Режим динамического торможения — режим, при котором происходит отклонение якоря двигателя от сети и замыкание его на резистор динамического торможения.

Электродвигателем при данном режиме развивается тормозной момент. Расход электроэнергии двигателя происходит в сопротивлениях динамического торможения и в сопротивлениях двигателя.

пользовать шпонки. Материалом вала ротора является сталь 45, а вентилятора — алюминий. Для установки на вал вентилятора при его отливке в нем устанавливают стальную втулку.

В устройстве выделяют также подшипниковые щиты, в центре которых выполняются отверстия для наружных обойм подшипников. Для предотвращения утечки смазки из подшипников во время работы машины подшипники закрываются крышками, имеющими развитые поверхности прилегания к валу и лабиринтные уплотнения.

Принцип действия асинхронного двигателя: обмотка статора подключается к сети трехфазного тока. В результате в ней образуется переменный ток, создающий вращающееся магнитное поле. Пересекая проводники обмотки ротора под действием закона электромагнитной индукции, магнитное поле создает переменную ЭДС. Направление ЭДС находят, применяя правило правой руки.

Момент приводит ротор в движение. В установившемся режиме ротор вращается в направлении, совпадающим с направлением магнитного поля. Частота вращения ротора при этом равна:

$$n = (0,92 + 0,98) n_{\text{с}}$$

Обмотку ротора необходимо изготавливать при этом из ферромагнитного материала, так как ее магнитные свойства должны быть аналогичны свойствам сердечника ротора. На практике же ее часто изготавливают из меди или алюминия.

Для двигателей последовательного возбуждения:

$$M = M_{\text{с}} = 0, \quad i_{\text{с}} = 0, \quad \Phi = 0, \quad n \rightarrow \infty.$$

В момент, когда двигатель подключают в сеть, все ступени реостата необходимо подключить к цепи якоря. При этом:

$$n = 0, \quad i_{\text{с}} = I_{\text{с}}, \quad M = M_{\text{с}}.$$

Условие $M_{\text{с}} > M_{\text{с}}$ является условием **переходного процесса**, которому соответствует увеличение значений частоты и ЭДС и уменьшение тока и момента.

Когда $n = n_{\text{с}}$, $i_{\text{с}} = I_{\text{с}}$, $M = M_{\text{с}}$ ток якоря и момент увеличиваются до значений $i_{\text{с}} = I_{\text{с}}$, $M = M_{\text{с}}$, происходит выключение ступени реостата с сопротивлением $r_{\text{с}}$.

Для двигателей последовательного и смешанного возбуждения справедливо соотношение:

$$n_{\text{с}} = \frac{U - I_{\text{с}}(r_{\text{с}} + r)}{U - I_{\text{с}}/I_{\text{с}}} n_{\text{с}} \quad (3)$$

Потери мощности в стали, механические потери и потери в цепи параллельной или независимой обмотки возбуждения относятся к классу **постоянных потерь**, так как на них не влияет изменение нагрузки двигателя.

КПД определяется как отношение полезной мощности машины постоянного тока $P_{\text{с}}$ к мощности, подводимой к машине $P_{\text{д}}$:

$$\eta = \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{д}}} \quad (3)$$

Подводимая к машине мощность определяется следующим соотношением:

$$P_{\text{д}} = P_{\text{с}} + \sum \Delta P_{\text{д}}$$

где ΔP — суммарные потери мощности.

Тогда КПД можно определить как:

$$\eta = \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{с}} + \sum \Delta P_{\text{д}}}$$

При холостом ходе значение полезной мощности достигает нулевого значения, в связи с чем и КПД равно нулю. Не всегда увеличение полезной мощности способствует повышению КПД. Увеличение значения $P_{\text{с}}$ целесообразно лишь до определенного момента, после достижения которого значение коэффициента начинает снижаться. Это объясняется тем, что переменные потери, пропорциональные квадрату тока, увеличиваются. Поэтому при расчете машин стараются приблизить максимальное значение КПД к номинальной мощности.

Согласно закону полного тока имеем:

$$2H_0 l_0 + H_{CT} l_{CT} = \sum iw,$$

где H_0, H_{CT} — напряженность магнитного поля воздушного зазора и участков сердечников ротора и статора соответственно;
 iw — МДС одной фазы обмотки.

B и H изменяют свои значения в зависимости от участка. Так, наибольшее их значение наблюдается в зубцах между пазами статора и ротора.

$$2H_0 l_0 \gg H_{CT} l_{CT}.$$

В связи с этим для простоты анализа магнитного поля принимают:

$$2H_0 l_0 = \sum iw.$$

Тогда имеем:

$$H_0 = \frac{\sum iw}{2l_0}.$$

Значение магнитной индукции воздушного зазора определяется по формуле:

$$B_0 = \mu_0 H_0.$$

Значения напряженности и магнитной индукции по всей длине воздушного зазора одинаковы в силу того, что по всей длине величина зазора не изменяется.

Так как:

$$\omega_s = 60f_s/p \quad (1)$$

имеем:

$$f_r = \omega_r/60 \quad (2)$$

Вращение ротора происходит в направлении магнитного поля двигателя, поэтому для определения частоты пересечения его обмотки магнитным полем необходимо найти разность между частотой вращения ротора и магнитного поля:

$$f_s = (\omega_s - \omega_r)/60. \quad (3)$$

Итак, частота тока статора относится к частоте тока ротора следующим образом:

$$\frac{f_s}{f_r} = \frac{n}{n_s - n}. \quad (4)$$

Тогда частоту ротора можно найти, используя следующее выражение:

$$f_r = \xi(\omega_s - \omega_r)/\omega_s = \xi s, \quad (5)$$

где s — скольжение.

Скольжение — безразмерная величина, представляющая собой частоту вращения ротора относительно поля статора, выраженную в долях частоты вращения поля статора.

$$s = (n_s - n)/n_s. \quad (6)$$

47 ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МОЩНОСТЬ И ПОТЕРИ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ

Во время работы двигатель потребляет из сети мощность, значение которой определяется по формуле:

$$P_1 = \sqrt{3}U_l \cos \varphi_1.$$

Как известно, посредством двигателей производится преобразование электрической энергии в механическую энергию.

Эти процессы преобразования энергии всегда происходят с определенными потерями энергии, следовательно, и мощности.

Потери мощности могут происходить в обмотке статора:

$$\Delta P_{\text{ст}} = 3I_1^2 r_1.$$

А также в сердечнике статора, где потери обусловлены перемагничиванием и вихревыми токами.

Электромагнитная мощность — это мощность, которая передается от вращающегося магнитного поля к ротору. Ее значения определяется:

$$P_{\text{эм}} = P_1 - \Delta P_{\text{ст}} - \Delta P_{\text{ст}} = 3E_{2\text{н}} I_2 \cos \varphi_2.$$

В двигателе также происходит процессы потери электромагнитной мощности. Эти потери в обмотке ротора составляют:

$$\Delta P_{\text{рот}} = 3I_2^2 r_2.$$

При работе двигателя развивается мощность, определяемая как произведение момента на частоту вращения:

$$P = M\omega.$$

Электромагнитная мощность — это мощность, которая передается от вращающегося магнитного поля к ротору. Ее значение определяется:

$$P_{\text{эм}} = M_{\text{эм}} \omega_r.$$

В процессе преобразования электрической энергии в механическую энергию возникает механическая мощность, определяемая формулой:

$$P_{\text{мех}} = M_{\text{мех}} \omega_r.$$

Значение величины потери мощности сердечника ротора мало по сравнению с потерями в обмотке ротора. Учитывая данное обстоятельство, потерями мощности сердечника ротора пренебрегают.

Тогда потери мощности в обмотке ротора определяются как разность мощностей электромагнитной и механической:

$$P_{\text{эм}} - P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{рот}} = 3I_2^2 r_2$$

или

$$M_{\text{эм}} \omega_r - M_{\text{мех}} \omega_r = 3I_2^2 r_2.$$

В состоянии покоя статора и скольжение равно единице:

$$s = (n_0 - 0)/n_0 = 1 \text{ и } f_2 = f_1, s = f_1 \cdot 1 = f_1.$$

Если ротор вращается с частотой, равной частоте вращения магнитного поля, то:

$$s = (n_0 - n_0)/n_0 = 0$$

$$f_2 = f_1, s = f_2 \cdot 0 = 0.$$

Когда ротор находится в состоянии покоя, условия, в которых находится его обмотка, аналогичны условиям обмотки статора. В связи с этим для определения ЭДС обмотки ротора можно воспользоваться формулой для определения ЭДС обмотки статора:

$$E_{2s} = 4,44 f_1 w_2 \Phi k_{02}, \quad (7)$$

где w_2 — число витков фазы обмотки ротора;
 k_{02} — обмоточный коэффициент обмотки ротора.

При вращении ротора ЭДС определяется соотношением:

$$E_2 = 4,44 f_2 w_2 \Phi k_{02}. \quad (8)$$

Следовательно:

$$E_2 = E_{2s} = \frac{E_1}{f_1}. \quad (9)$$

Если мы подставим значение для f_2 из формулы (5), получим:

$$E_2 = E_{2s} = f_2 s / f_1 = E_{2s} s. \quad (10)$$

Учитывая последнее равенство, получим формулу для нахождения электромагнитной мощности:

$$M_{\text{эм}} = \frac{3 E_2 I_2}{\omega_0 - \omega}.$$

Разность $\omega_0 - \omega$ заменяется на $\omega_0 s$. Тогда формула для нахождения электромагнитного момента имеет вид:

$$M_{\text{эм}} = \frac{3 E_2 I_2}{\omega_0 s}.$$

Электромагнитная мощность при этом будет определяться формулой:

$$P_{\text{эм}} = \frac{3 E_2 I_2}{s}.$$

Электромагнитный момент двигателя на валу превышает значение момента двигателя на валу. Эта разница между моментами возникает из-за действующих сил трения в подшипниках и роторе, а также из-за вентиляционных потерь:

$$M = M_{\text{эм}} - \Delta M_{\text{мех}}.$$

На практике считают, что:

$$M = M_{\text{эм}}.$$

Если распределение магнитной индукции воздушного зазора осуществляется по синусоидальному закону, характеристики двигателя имеют наиболее эффективные значения.

Амплитуда магнитной индукции постоянна и превышает значение амплитуды одной фазы в 1,5 раза.

Мгновенное значение тока в начальный момент времени имеет нулевое значение, и, соответственно, не возникает магнитное поле. При этом:

$$i_m w = i_m w \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} i_m w = B_m \frac{\sqrt{3}}{2} = B_a = B_c.$$

Результирующее магнитное поле имеет амплитуду:

$$\begin{aligned} B_{\text{рез}} &= 2 B_a \cos 30^\circ = 2 B_a \frac{\sqrt{3}}{2} \cos 30^\circ = \\ &= 2 B_a \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{3}{2} B_a. \end{aligned}$$

Угловая скорость магнитного поля определяется по формуле:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}; T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Следовательно:

$$\omega = \omega_0; n_0 = 60 f_1.$$

На практике двухполюсные асинхронные двигатели имеют несколько пар полюсов, тогда:

$$n_0 = 60 f_1 / p$$

а в сердечнике ротора $\Delta P_{\text{сг}}$ потери обусловлены перемагничиванием и гистерезисом.

В процессе преобразования электрической энергии в механическую энергию возникает механическая мощность, определяемая формулой:

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{эм}} - \Delta P_{\text{мех}} - \Delta P_{\text{сг}}.$$

Как и в любом механизме, в двигателе присутствует действие сил трения.

Эти силы возникают, например, в подшипниках ротора в процессе их трения о воздух. На эти силы трения также расходуется часть мощности.

Мощность на валу двигателя равна:

$$P_a = P_{\text{мех}} - \Delta P_{\text{мех}}.$$

Таким образом, все затраты мощности расходуются на продувание воздуха внутри двигателя, целью которого является улучшение охлаждающего эффекта.

Но все эти потери преобразуются в тепло, в результате чего двигатель нагревается. Исключение составляют потери мощности на вентиляцию.

49 МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Механическая характеристика — это зависимость частоты вращения ротора двигателя или скольжения от момента, развиваемого двигателем при установившемся режиме работы:

$$n = f(M); \quad s = f(M)$$

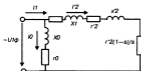


Рис 11. Замещающая схема асинхронного двигателя

С помощью замещающей схемы (рис. 11) найдем приведенный ток в фазе ротора:

$$I_2 = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2}{s}\right) + (x_1 + x_2)^2}} \quad (1)$$

где

$$\frac{r_2}{s} = r_1 + \frac{r_2(1-s)}{s} \quad (2)$$

51 ПУСК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Время работы двигателя момент сил на валу может принимать любое значение, не превышающее M_{max} . В противном случае произойдет останова двигателя. В интервале значений $s < s_{кр}$ считают, что вариация значений момента происходит в интервале от 0 до $(0,8 + 0,9)M_{max}$. Способ пуска с использованием выключателя характеризуется малым пусковым моментом, значения которого изменяются в пределах $(1,2 + 1,6)M_{max}$; также наблюдается большое значение пускового тока, равного $(5 + 7)I_{ном}$.

Во время пуска двигателя необходимо, чтобы второй выключатель был выключен. Включается первый выключатель, и, когда ротор достигнет установившегося режима, включают второй выключатель.

Когда для пуска двигателя применяется фазный ротор, в цепь ротора подключают добавочные резисторы. Пусковой ток определяется при этом формулой:

$$I_{20} = \frac{E_{20}}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + x_2^2}}$$

Пусковой ток статора равен:

$$I_{21} = I_2 + I_{20}$$

50 ПАСПОРТНЫЕ ДАННЫЕ ДВИГАТЕЛЯ. РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Существуют специальные каталоги, в которых можно найти необходимые данные для расчета и анализа двигателей. К таким данным относятся: тип двигателя $P_{ном}$, $U_{ном}$, $I_{ном}$, $\eta_{ном}$, $\cos \phi_{ном}$, $M_{ном} / M_{max}$, $I_2 / I_{ном}$ — для двигателя, имеющего короткозамкнутый ротор; U_{20} / E_{20} и I_{20} — для двигателя, имеющего фазный ротор. В буквенно-цифровых обозначениях двигателей содержится информация о назначении двигателя, его габаритной мощности, о количестве пар полюсов и т.п.

Номинальная мощность $P_{ном}$ двигателя — его назначения длительного режима работы — это мощность, которую двигатель может длительно развивать на валу, нагреваясь при этом до допустимой температуры, зависящей от класса изоляции его обмоток.

Двигатель нагревается из-за преобразования потерь мощности в теплоту. Момент, когда вся теплота от потерь мощности переходит в окружающую среду, а температура двигателя не изменяется по достижении какого-либо определенного значения, называется **тепловым равновесием**.

Нельзя допускать, чтобы двигатель достаточно длительное время работал на напряжении либо повышенным, либо пониженным. В противном случае величина тока в обмотках превыша-

52 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

К энергетическим характеристикам асинхронного двигателя относятся КПД и коэффициент мощности от действия нагрузки на валу двигателя.

КПД представляет собой отношение отдаваемой с вала мощности к мощности, которую двигатель потребляет:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}$$

где ΔP — потери мощности.

Потери мощности ΔP представляют собой сумму всех потерь мощности в обмотках и сердечниках ротора и статора двигателя, а также потерь механической мощности:

$$\Delta P = \Delta P_{обм} + \Delta P_{сст} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{рт} + \Delta P_{мех}$$

Потери мощности в двигателе подразделяются на постоянные, на значение которых нагрузка влияния не оказывает; и переменные, соответственно зависящие от нагрузки.

Постоянные потери определяются:

$$\Delta P_p = \Delta P_{ст} + \Delta P_{рт} + \Delta P_{мех}$$

К переменным потерям относятся:

$$\Delta P_v = \Delta P_{обм} + \Delta P_{сст}$$

ет номинальное значение. Это приводит к перегреву двигателя и, как следствие, к потере им работоспособности, т.е.:

$$U_{\text{ф}} = E_1 = 4,44 f_m \Phi N_{\text{ф1}}.$$

Магнитный поток двигателя также увеличивается, растет значение тока намагничивания и тока обмотки статора. Поскольку

$$M = C \Phi_2 \cos \varphi_2,$$

уменьшение напряжения приводит к уменьшению магнитного потока, увеличению тока ротора и тока статора. Также уменьшаются значения пускового и максимального моментов двигателя.

При задании какой-либо нагрузки на двигатель он потребляет из сети мощность, определяемую соотношением:

$$P_1 = P_2 / \eta = \sqrt{3} U \cos \varphi.$$

Для расчета механической характеристики двигателя используют упрощенную формулу уравнения механической характеристики. Параметры механической характеристики вычисляются с помощью формул:

$$M_{\text{max}} = IM_{\text{max}} = \lambda \frac{975 P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = \lambda \frac{9550 P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} [H \cdot M];$$

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} (\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1}).$$

Отношение активной мощности двигателя к полной мощности определяет коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}.$$

Значение реактивной мощности Q представляет собой сумму мощности главного магнитного потока и мощности потока рассеяния:

$$Q_1 = \ell_2 x_2; \quad Q_2 = \ell_1 x_1 + \ell_2 x_2$$

где x_1 — индуктивное сопротивление от главного магнитного потока;

x_1, x_2 — индуктивные сопротивления от потоков рассеяния статора и ротора.

Нагрузка практически не оказывает влияния на реактивную мощность, которую двигатель потребляет из сети. Это обусловлено превышением значения главного магнитного потока над потоками рассеяния. Изменение нагрузки оказывает серьезное влияние на коэффициент мощности. Так, если нагрузки на валу двигателя имеют небольшие значения, то и коэффициент мощности имеет малое значение.

Формула определения электромагнитного момента имеет вид:

$$M_{\text{эм}} = \frac{3 \ell_2 I_2}{\omega_2 s}. \quad (3)$$

Найденное значение тока фазы ротора подставляется в формулу для момента (3). Тогда получим:

$$M = \frac{3 \ell_2 I_2}{\omega_2 s} = \frac{3 \ell_2^2 I_2}{\omega_2 s} = \frac{3 U_{\text{ф}}^2 I_2}{\omega_2 s \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}. \quad (4)$$

Уравнение (4) является **уравнением механической характеристики**. Графическая механическая характеристика имеет вид, изображенный на рисунке 12.

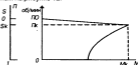


Рис. 12. График механической характеристики асинхронного двигателя

Наибольшее значение момента двигателя достигается в точке с координатами $p_{\text{кр}}, s_{\text{кр}}, M_{\text{кр}}$.

Пусковой момент определяется по формуле:

$$M_{\text{п}} = \frac{3 \ell_2^2 (r_1' + r_2')}{\omega_2 [(r_1' + r_2')^2 + x_2'^2]}.$$

При выполнении равенства $r_1' + r_2' = x_2'$ пусковой момент достигает наибольшего значения:

$$M_{\text{п}} = M_{\text{кр}} = \frac{3 \ell_2^2}{2 \omega_2 x_2'}.$$

Пусковое сопротивление проще рассчитывать, используя искусственную механическую характеристику:

$$M_{\text{кр}} = \frac{2 M_{\text{ном}}}{\frac{s_{\text{кр}}}{s_{\text{ном}}} + \frac{s_{\text{ном}}}{s_{\text{кр}}}}.$$

Критическое значение скольжения естественной характеристики определяется как:

$$s_{\text{кр}} = \frac{r_2'}{x_2'};$$

искусственной характеристики:

$$s_{\text{кр}} = \frac{r_1' + r_2'}{x_2'}.$$

53 АСИНХРОННЫЙ ТАХОГЕНЕРАТОР

Тахогенератор — это электрическая машина, посредством которой происходит преобразование частоты вращения в электрический сигнал.

Выходная характеристика — это зависимость напряжения на выходе тахогенератора от частоты вращения.

Область применения тахогенераторов является применение их в качестве измерителей частоты вращения, для выработки сигналов, а также для выполнения дифференцирования.

Устройство тахогенератора аналогично устройству однофазного асинхронного двигателя с полным немагнитным ротором. Обмотки статора сдвинуты друг относительно друга на 90°. Одна из обмоток называется обмоткой возбуждения, другая — выходной генераторной обмоткой.

Магнитный поток Φ создается током обмотки возбуждения. Данная обмотка подключается к сети переменного тока. Образующийся магнитный поток оказывает действие на немагнитный ротор и на генераторную обмотку.

Когда ротор двигателя находится в состоянии покоя, в генераторной обмотке не происходит образования ЭДС. Это происходит в силу того, что угол между обмоткой и магнитным потоком в этот момент равен 90°.

Направление магнитного потока ротора противоположно направлению потока возбуждения. При этом магнитный поток двигателя, воздействуя на поток возбуждения, понижает его вели-

54 ВРАЩАЮЩИЙСЯ ТРАНСФОРМАТОР

Вращающийся трансформатор — это электрическая машина, устройством которой аналогично асинхронному двигателю с контактными кольцами. Периодом данного двигателя происходит преобразование угла поворота ротора в напряжение, значение которого пропорционально функции этого угла.

В зависимости от напряжения на выходе трансформатора они подразделяются на синусные, линейные, а также трансформаторы-построители, для которых:

$$U_{\text{ном}} = C \sqrt{P_{\text{ном}} + U_{\text{ном}}^2}$$

Напряжение синусных трансформаторов пропорционально либо синусу, либо косинусу угла поворота; напряжение линейных трансформаторов на выходе пропорционально непосредственно углу поворота ротора.

Все эти напряжения можно получить на одном и том же трансформаторе, если в его устройство включить по две обмотки на статор и ротор и изменить схемы их соединения.

Областью применения вращающихся трансформаторов является та, где применяются САУ (системы автоматического управления), различные устройства вычислительной техники, посредством которых выполняется решение тригонометрических и геометрических задач.

Так, обмотки статора, как и ротора, сдвинуты друг относительно друга на 90°. На концах обмот-

55 ПОНЯТИЕ О ЛИНЕЙНОМ ТРЕХФАЗНОМ АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ

Наиболее распространенным среди электрических двигателей является трехфазный асинхронный двигатель, впервые сконструированный известным русским электриком М. О. Доливо-Добровольским в 1890 году.

Линейные трехфазные асинхронные двигатели применяются для осуществления операции линейных перемещений элементов каких-либо механизмов на предприятиях.

В основе принципа действия подобных двигателей лежит явление возникновения магнитного поля, называемого бегущим. Это магнитное поле возникает в неподвижной трехфазной обмотке.

Отличием линейного трехфазного двигателя от трехфазного двигателя с вращающимся ротором является характеристика движения магнитного поля.

Так, характеристикой движения магнитного поля двигателя с вращающимся ротором является частота вращения магнитного поля, а в линейном асинхронном трехфазном двигателе — линейная скорость перемещения.

Среди элементов, входящих в устройство линейного трехфазного асинхронного двигателя, выделяются следующие: две обмотки — обмотка статора и обмотка ротора; соответствующие им сердечники — сердечник ротора и неподвижный сердечник статора. Обмотка ротора короткозамкнута.

56 НАЗНАЧЕНИЕ И УСТРОЙСТВО СИНХРОННЫХ МАШИН

Отличительной особенностью синхронных машин от асинхронных является то, что используются они не только как двигатели, но и как генераторы.

Синхронные машины относятся к классу машин переменного тока. Установившийся режим работы двигателя характеризуется равенством угловых скоростей вращения ротора и магнитного поля статора. Синхронные машины можно использовать также в качестве синхронных компенсаторов.

Так, примером области применения синхронных генераторов могут служить электростанции (тепловые, гидроэлектростанции и т. п.) и автомобильные электрические станции. В зависимости от способа приведения генератора во вращение они могут быть: турбогенераторами (вращение задается паровыми турбинами), гидрогенераторами (вращаются посредством гидротурбин). Еще одним способом приведения во вращение синхронных генераторов является вращение посредством двигателя внутреннего сгорания. Такой способ находит применение в установках, где необходим автономный источник энергии (например, на транспорте, на строительных машинах либо на передвижных электростанциях).

Если в устройстве необходимо обеспечить постоянную частоту вращения, то применяются синхронные двигатели.

Они используются на металлургических заводах как приводы прокатных станов; также их можно использовать как насосы либо компрес-

ки ротора имеются три вывода, припаянных к трем контактным кольцам.

В синусных трансформаторах производится подача переменного напряжения на обмотку возбуждения. Под действием данного напряжения в обмотке возникает ток. Образовавшийся ток в свою очередь приводит к появлению переменного магнитного потока, оказывающего действие на обе обмотки ротора.

Потоки обмоток ротора раскладываются на две составляющие: продольные и поперечные проекции. Продольные проекции определяются по формулам:

$$\Phi_{\sigma} = \Phi_r \cos \alpha, \quad \Phi_{\sigma} = \Phi_r \sin \alpha,$$

где S и C — обмотки ротора.

В обмотке возбуждения напряжение на выходе равно:

$$U_{\text{вв}} = E_{\text{вв}} = 4,44 w_{\text{вв}} f \Phi_r.$$

В обмотках ротора напряжение определяется:

$$U_x = E_x = 4,44 w_x f \Phi_r \cos \alpha = E_{\text{вв}} \cos \alpha,$$

$$U_c = E_c = 4,44 w_c f \Phi_r \sin \alpha = E_{\text{вв}} \sin \alpha.$$

Данные выражения применимо и для случая холостого хода.

соры на станциях, производящих транспортировку газа или нефти.

Иногда возникает необходимость в повышении коэффициента мощности некоторых установок. При этом синхронные машины используются в качестве синхронных компенсаторов. В таких машинах напряжение отстает по фазе от тока. В устройстве синхронных машин выделяется две части: неподвижный статор и ротор, вращающийся внутри статора. Между статором и ротором находится воздушный зазор.

Устройство статора синхронных машин включает в себя те же элементы, что и статор асинхронной машины, а также шихтованный цилиндрический сердечник, на внутренней поверхности которого изготавливаются специальные пазы. Эти пазы служат для соединения с фазами трехфазной обмотки статора. В синхронной машине ротор — это электромагнит постоянного тока, посредством которого создается вращающееся магнитное поле. Обмотка возбуждения устанавливается на роторе. Эта обмотка соединяется с источником постоянного тока с помощью специальных колец ротора и графитовых щеток.

В синхронных машинах выделяются роторы с явно выраженными полюсами и с полюсами неявно выраженными. Областью применения синхронных машин, включающих роторы с явно выраженными полюсами, являются тихоходные машины ($n \leq 1000$ об/мин.). Обмотки возбуждения в таких машинах располагаются непосредственно на полюсах ротора. Достоинством синхронных машин, включающих роторы с неявно выраженными полюсами, является высокая динамическая прочность ротора.

чену, однако положение потока возбуждения не изменяется.

В момент вращения ротора он пересекает поток возбуждения, в результате чего создается ЭДС вращения.

Под действием указанной ЭДС возникает ток в роторе, создающий магнитный поток $\Phi_{\text{вр}}$. Данный магнитный поток совпадает с осью генераторной обмотки.

Под действием потока $\Phi_{\text{вр}}$ в генераторной обмотке образуются ЭДС и ток.

Главное требование, предъявляемое к тахогенераторам заключается в линейности выходной характеристики — пропорциональной зависимости между выходным напряжением V и угловой скоростью вращения ω :

$$V = k\omega = k' \frac{d\theta}{dt},$$

где k, k' — коэффициенты пропорциональности.

Тахогенераторы можно использовать для измерения скорости вращения и для электромагнитического дифференцирования, если за входной сигнал принять угол поворота ротора.

Для определения скорости бегущего магнитного поля пользуются формулой:

$$\theta_s = \pi D n_s = f \cdot 60 \frac{f}{p},$$

где l — длина элемента линейного двигателя.

Статор линейного двигателя изготавливается из нескольких элементарных двигателей, соединенных между собой путем стыковки. Такое устройство статора позволяет обеспечить необходимый путь перемещения для подвижного ротора. Длина ротора принимается равной длине отдельно взятого элементарного двигателя. Перемещение ротора линейного двигателя должно обеспечивать постоянство воздушного зазора между ротором и статором.

Для защиты трехфазных синхронных двигателей от перегрузок достаточно иметь токовые реле в одной фазе каждого двигателя (блок-реле РМ1, РМ2 и РМ3), а две другие фазы двигателя можно объединить под общие блок-реле РМ01 и РМ02, которые защищают линейные провода от короткого замыкания. Нулевая защита обеспечивается самим контактором. После срабатывания любого из аппаратов защиты или конечных выключателей вновь включить схему в работу можно лишь после возврата всех контроллеров в нулевое положение.

57 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРА

Для возникновения магнитного поля в обмотке ротора ее подключают к источнику постоянного тока. Характеристикой образующегося при этом магнитного поля будет магнитный поток Φ_r . Данное магнитное поле имеет два полюса N_r и S_r и вращается вместе с ротором.

Индукция магнитного поля синхронных машин должна распространяться по приближенному к синусоидальному закону. В этом случае и ЭДС будут изменяться по синусоидальному закону. Для достижения данной цели либо используют изменяющийся по своей длине воздушный зазор между полюсными наконечниками и сердечником статора (синхронные машины с явно выраженными полюсами), либо определенным образом укладывают концы обмотки возбуждения в пазах сердечника статора. Значение величины ЭДС проводника одной фазы определяется по формуле:

$$e = Bvl,$$

где B — магнитная индукция воздушного зазора;

l — активная длина проводника в пазах статора;

v — линейная скорость пересечения проводника магнитным полем.

Также значение ЭДС можно рассчитать по формуле:

$$E_g = 4,44 k w f \Phi_r$$

а частоту найти с помощью выражения:

$$f = \frac{p n}{60}$$

58 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЯ

Синхронные машины можно применять как генераторы, двигатели, либо как синхронные компенсаторы. Принцип действия всех типов машин основан на одинаковом их устройстве.

В устройстве синхронных машин включается статор, представляющий собой неподвижную часть. Он состоит из корпуса, изготовленного из стали или чугуна. Трехфазная обмотка устанавливается в пазах сердечника статора.

Якоря машины — совокупность сердечника статора и его обмотки.

На торцах корпуса устанавливаются подшипниковые щиты, в которых устанавливаются несущие вал подшипники. В устройство также включен ротор или же индуктор, являющийся подвижной частью машины. Сердечник ротора, в пазах которого расположена обмотка возбуждения, устанавливается на вал. Обмотка возбуждения получает питание от генератора постоянного тока. Вал генератора подводится к валу синхронной машины.

В основе принципа действия синхронного двигателя лежит явление притяжения двух разноименных магнитных полюсов — магнитного поля ротора и поля статора.

Обмотку якоря синхронного двигателя подключают к сети трехфазного тока, что приводит к возникновению магнитного потока якоря Φ_a . Когда частоты вращения ротора и поля якоря становятся равными, производят подключение обмотки якоря к сети постоянного тока. В этом случае образуется магнитный поток Φ_r .

59 СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

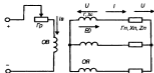


Рис. 13. Схема включения синхронной машины, работающей в качестве генератора

При анализе синхронной машины предположим, что она представляет собой генератор с явно выраженными полюсами, а его ферромагнитные материалы ненасыщены.

В этом случае магнитные потоки генераторы не зависят друг от друга. Данные магнитные потоки пропорциональны соответствующим им МДС.

МДС обмотки возбуждения вызывает появление основного магнитного потока Φ . Этот поток индуцирует ЭДС E в каждой из фаз обмотки якоря.

Посредством МДС обмотки якоря создается поток рассеяния Φ_a , индуцирующий ЭДС самоиндукции E_a в обмотке якоря.

Аналогично МДС обмотки якоря вызывает магнитный поток якоря Φ_a . Во всех трех случаях ЭДС можно заменить соответствующими вели-

60 ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Рассмотрим пример построения векторной диаграммы напряжения в зависимости от активной-индуктивной нагрузки.

В первую очередь производится построение вектора ЭДС E_g . Вектор тока сдвинут относительно вектора ЭДС на угол φ . Угол между током и напряжением составляет величину φ . По отношению к вектору тока под углом проводится линия OA . Из конца вектора ЭДС на вектор тока опускается перпендикуляр, пересекающий линию OA в некоторой точке (Γ). Точка Γ является концом вектора напряжения и началом вектора падения напряжения $jX_s I$.

Напряжение представляет собой:

$$U = E_g - jX_s I \quad (1)$$

Если магнитные потоки имеют постоянную величину, их можно заменить на эквивалентные. Изменение эквивалентных потоков осуществляется по закону, близкому к синусоидальному. Уравнение (1) можно представить в виде:

$$U = E_g + E_a$$

В силу пропорциональности ЭДС магнитным потокам имеем:

$$\Phi = \Phi_g + \Phi_a \quad (2)$$

Угол θ представляет собой угол сдвига фаз между векторами потока Φ_g и результирующего потока Φ .

Электромагнитный момент $M_{эм}$ возникает от взаимодействия магнитного потока якоря с проводниками обмотки ротора. Данный электромагнитный момент оказывает воздействие на ротор двигателя. В процессе работы двигателя частота вращения момента сравнивается с частотой вращения магнитного поля якоря.

На величину электромагнитного момента, а также на положение оси магнитного поля ротора по отношению к оси поля якоря оказывает влияние нагрузка двигателя. Например, когда работа двигателя описывается характеристикой холостого хода, электромагнитный момент принимает нулевое значение. Встречаются случаи, когда электромагнитный момент имеет постоянное значение. При этом на ток якоря, а также на интенсивность и характер действия реакции якоря будет оказывать влияние величина ЭДС.

При действии на двигатель индуктивной или активно-индуктивной нагрузки магнитное поле якоря осуществляет подмагничивание двигателя. При действии на двигатель емкостной или активно-емкостной нагрузки магнитное поле якоря осуществляет размагничивание двигателя.

Отличительной особенностью синхронных двигателей от асинхронных является равенство частот вращения ротора и магнитного поля якоря. Это происходит вследствие того, что источником питания обмотки возбуждения является источник постоянного тока.

Так как магнитное поле вращается с частотой вращения ротора, то:

$$\Omega_2 = \Omega = \frac{60f}{p}.$$

На рисунке 14 (а, б, в) изображены векторные диаграммы для случаев активной, активно-емкостной нагрузок, а также для случая холостого хода генератора.

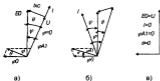


Рис. 14. Векторные диаграммы генераторов, имеющих соответственно активную (а), активно-емкостную (б) нагрузку и для случая холостого хода (в)

Для случая холостого хода принимаются следующие значения основных величин:

$$Z_n = \infty \text{ и } I = 0, I_x = 0, U = E_0, \Phi = \Phi_0.$$

Уменьшить сопротивление можно путем увеличения количества приемников, подключаемых к генератору. Таким образом регулируются значения тока I , а следовательно, и величины падения напряжения Ix_c , а также значение потока Φ_n .

Индукция, распределяющаяся по синусоидальному закону, определяется:

$$B = B_m \sin \alpha,$$

где $\alpha = \omega t$ — угол, отсчет которого производится от нейтральной линии при вращении ротора.

Поскольку ЭДС фаз обмотки также изменяется по синусоидальному закону, то:

$$e = B_m l v \sin \alpha = E_m \sin \omega t.$$

Когда генератор работает с нагрузкой, происходит образование токов в обмотках якоря и приемника. В этом случае электрическая энергия генератора переходит в энергию приемника. Вращающееся магнитное поле якоря при этом характеризуется величиной магнитного потока Φ_n . Магнитное поле вращается с частотой вращения ротора:

$$\Omega_2 = \Omega = \frac{60f}{p}.$$

Реакция якоря — воздействие поля якоря на результирующее магнитное поле генератора.

Взаимодействие магнитного поля якоря с проводниками обмотки возбуждения приводит к тому, что на ротор начинает действовать электромагнитный момент. Этот момент направлен в сторону, противоположную направлению частоты вращения ротора.

чинами падения напряжения. Эквивалентная ЭДС определяется:

$$E_n = E_0 + E_s = I(x_c + x_n) = Ix_c,$$

где $X_n = X_c + X_n$ — синхронное сопротивление.

ЭДС фаз обмотки якоря определяются формулой:

$$E_0 = I(r + jx_c + U).$$

Из-за малости значения r по сравнению с имеем:

$$E_0 = jx_c + U.$$

Используя закон Ома, можно записать выражение для определения напряжения на выводах генератора:

$$U = IZ_n = Ix_c + jIx_n.$$

Тогда:

$$E_0 = jIx_c + Ix_n + jIx_c.$$

Ток и напряжение можно определить по формулам:

$$I = \frac{E_0}{r_n + j(x_c + x_n)};$$

$$U = E_0 - jIx_c.$$

61 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Основной естественной внешней характеристикой синхронного генератора считают кривую, полученную при симметричном режиме, коэффициенты мощности приемных $\cos \varphi = 0,8$ и $\varphi > 0$.

Для поддержания напряжения синхронного генератора неизменным при переменной нагрузке приходится регулировать ток возбуждения I_B в обмотке ротора по закону, определяемому регулировочными характеристиками, крутизна которых зависит от характера нагрузки и ее коэффициента мощности. Так, при увеличивающемся токе нагрузки, отстающем по фазе от напряжения на угол $\varphi > 0$, возникает размагничивающее действие реакции якоря и соответствующая регулировочная характеристика поднимается, а при возрастающем токе нагрузки, опережающем по фазе напряжение на угол $\varphi < 0$, она снижается вследствие подмагничивающего действия реакции якоря.

К характеристикам синхронного генератора относятся характеристика холостого хода, внешняя характеристика, а также регулировочная характеристика.

Как известно, магнитный поток синхронного генератора представляет собой функцию тока возбуждения $\Phi_B(I_B)$. Для определения ЭДС генератора с учетом вышесказанного применяется выражение:

$$E_c = 4,44 k_w \frac{p}{60} \Phi_B(I_B).$$

63 УГЛОВАЯ И МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Потребляемая из сети мощность двигателя определяется формулой:

$$P_r = 3UI \cos \varphi.$$

В обмотке якоря двигателя при работе происходят потери мощности, учитывая которые, мы получим значение электромагнитной мощности:

$$P_m = P_r - \Delta P_a = 3UI \cos \varphi - 3I^2 r = 3E_c I \cos \varphi.$$

Величина электромагнитного момента находится в зависимости от электромагнитной мощности и угловой скорости ротора:

$$M = \frac{P_m}{\omega} = \frac{3E_c I \cos \varphi}{\omega}.$$

Учитывая, что $I \cos \varphi = U \sin \frac{\theta}{X_c}$, получим:

$$M = \frac{3E_c U}{\omega X_c} \sin \theta.$$

Угловая характеристика синхронного двигателя представляет собой прямую зависимость значения момента от угла θ . Эта характеристика имеет место, когда значения напряжения, ЭДС, угловой скорости и сопротивления постоянны.

62 ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Напряжение синхронного двигателя определяется с помощью уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа с учетом малости величины падения напряжения Ir :

$$U = E_c + jI X_c.$$

С учетом данного уравнения, задавая определенные значения механической нагрузки и тока возбуждения, изобразим соответствующую векторную диаграмму (рис. 15).



Рис. 15. Векторная диаграмма синхронного двигателя при механической нагрузке

Алгоритм построения векторной диаграммы, приведенной на рисунке 15, следующий: вектор напряжения U откладывается в определенном масштабе, затем строится вектор тока под углом φ к вектору напряжения. Из конца вектора напряжения на вектор тока опускается перпендикуляр AB . Данный перпендикуляр определяет

8 ПУСК СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассмотрим случай, когда к сети трехфазного тока подключается обмотка якоря, обмотка возбуждения получает энергию от источника постоянного тока, а ротор находится в состоянии покоя. Образующееся в обмотке якоря магнитное поле, взаимодействуя с проводником ротора, способствует появлению момента, изменяющегося в зависимости от вращения поля.

Синхронное вращение ротора достигается при равенстве частоты вращения ротора и частоты вращения поля якоря. Синхронное вращение соответствует установившемуся режиму работы двигателя. Для достижения такого режима применяется асинхронный пуск синхронного двигателя. Он заключается в применении пусковой обмотки.

В устройстве пусковой обмотки включены два стержня, которые укладываются в пазах полюсных наконечников.

С торцевых сторон производится замыкание коротко данных стержней.

При асинхронном пуске двигателя за разгон ротора отвечает вращающееся поле якоря, взаимодействующее с проводниками короткозамкнутой обмотки. При приближении величины частоты вращения ротора к величине частоты вращения поля якоря обмотка возбуждения подключается к сети постоянного тока.

При пуске двигателя значения напряжения могут достигать больших значений, в результате чего может произойти повреждение изоляции обмотки возбуждения. Для исключения подобных негативных последствий производится

конец вектора ЭДС и начало вектора падения напряжения.

В силу пропорциональности ЭДС магнитных потоков имеем:

$$\Phi = \Phi_s - \Phi_{\Sigma}.$$

Напряжение двигателя можно определить также с помощью следующей формулы:

$$U = E = E_s + j\beta X_c = E_s - E_{\Sigma}.$$

Вращающий момент синхронного двигателя при пуске равен 0, поэтому пуск двигателя состоит из двух этапов: первый этап — синхронный пуск с помощью короткозамкнутой обмотки, расположенной на роторе, и второй этап — втягивание в синхронизм после включения постоянного тока возбуждения. Во время первого этапа асинхронного пуска обмотка возбуждения отключается от источника постоянного тока и замыкается на активное сопротивление, превышающее активное сопротивление обмотки возбуждения в 10—15 раз. Не следует оставлять обмотку возбуждения разомкнутой, т. к. вращающееся поле может индуцировать в ней весьма значительную ЭДС, опасную для изоляции. Но с другой стороны, нецелесообразно было бы замыкать эту обмотку накоротко, т. к. в ней возникает значительный однофазный ток, который будет тормозить ротор по достижении им половины синхронной скорости.

подключение обмотки возбуждения к резистору.

Условиями пуска синхронного двигателя являются:

$$M_s > M_C; s \leq 0,05.$$

Значение указанной величины скольжения достигается при частоте вращения $n \geq 0,95n_0$. При достижении значения скольжения $s=0,05$ момент двигателя носит название **входного момента**. Таким образом, дополнительным условием пуска синхронного двигателя является:

$$M_{\text{вх}} > M_C.$$

Между пусковыми, входными и номинальными моментами существует определенная взаимосвязь, а именно:

$$\frac{M_{\text{вх}}}{M_{\text{ном}}} = 0,7 + 2,9; \quad \frac{M_{\text{вх}}}{M_{\text{ном}}} = 0,6 + 2,3.$$

Контроль магнитного потока осуществляется путем изменения значения тока посредством реостата r_p . Тем самым оказывается влияние и на значение ЭДС E_s . Условиями, при которых определяется характеристика холостого хода, являются: $i = 0$, $n = \text{const}$.

Для определения внешней характеристики синхронного генератора необходимо удовлетворить условиям: $n = \text{const}$, $i_a = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$.

Для определения относительного изменения напряжения используют следующее выражение:

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{U_s - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100 = \frac{\Delta U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100,$$

где U_s — напряжение, соответствующее холостому ходу генератора;

$U_{\text{ном}}$ — напряжение генератора с номинальной нагрузкой.

При изменении нагрузки генератора происходит и изменение напряжения. Причем данные изменения напряжения достаточно существенны. В связи с этим возникает необходимость уменьшать значения этих изменений: производится воздействие на ток возбуждения, вследствие чего происходит изменение значения ЭДС генератора. С помощью регулировочных характеристик определяют необходимые пределы изменения тока возбуждения. При определении регулировочных характеристик синхронного генератора удовлетворяют условиям: $n = \text{const}$ и $\cos \varphi = \text{const}$.

Устойчивая работа двигателя наблюдается на интервале изменения угла: от 0 до 90°, где $M = M_C$. Этот участок называют **устойчивой характеристикой**.

Интервал изменения угла θ в пределах от 20 до 30 характеризуется номинальным режимом работы двигателя. При $\theta=90^\circ$:

$$M = M_{\text{ном}} = \frac{3UE_s}{\omega X_c}.$$

Момент сопротивления не должен превышать значения максимального момента. В противном случае происходит останов двигателя.

Перегрузочная способность двигателя представляет собой отношение максимального момента к моменту номинальному $M_{\text{ном}}/M_{\text{ном}}$.

График механическую характеристику синхронного двигателя изображают в виде прямой, проходящей параллельно оси абсцисс (рис. 16). Частота вращения двигателя постоянна.

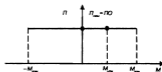


Рисунок 16. График механической характеристики синхронного двигателя

65 АППАРАТУРА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И ПРОСТЕЙШЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Приведение двигателя в рабочее состояние, а также для его отключения используется контактор. В конце рабочей смены либо при ремонте двигателя производится снятие напряжения посредством специального выключателя В.

Контактор — электромагнитный силовой аппарат, с помощью которого производят включение и остановку двигателя либо электрических печей, а также других силовых цепей. Контакторы классифицируются на контакторы постоянного тока и тока переменного.

В устройстве контактора переменного тока входят катушка, неподвижный сердечник, якорь и валки, являющийся основой крепления якоря. При включении данной электромагнитной системы к сети образуется магнитный поток. Притягивая якорь, данный магнитный поток становится причиной вращения валика. Закрепленные на валике силовые подвижные контакты, а также неподвижные контакты замыкаются. В момент поворота валика вспомогательные замыкающие контакты контактора замыкаются, а его размыкающие контакты размыкаются.

Изменение магнитного потока происходит по закону, близкому синусоидальному. Сила притяжения якоря к сердечнику определяется:

$F = \Phi^2$, т.е. она пропорциональна квадрату величины магнитного потока. Таким образом, мы можем наблюдать вибрацию якоря и подвижных

66 БЕСКОНТАКТНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Контактор — силовой электротехнический аппарат, с помощью которого осуществляется включение и отключение силовых цепей (двигателей, электрических печей и т. д.).

Контакторы классифицируют на контакторы постоянного и переменного тока.

В устройстве электромагнитной системы контактора включена катушка, неподвижный сердечник и якорь, устанавливаемый на валике. При включении катушки в сеть переменный ток катушки создает магнитный поток, притягивающий якорь и тем самым поворачивающий валик. Результатом поворота валика является замыкание подвижных и неподвижных силовых контактов.

Сердечник и якорь электромагнитной системы контактора изготавливают из отдельных листов электротехнической стали. Таким образом, обеспечиваются малые потери, обусловленные действием вихревых токов.

В состав аппаратов управления релейно-контактных систем входят подвижные части и замыкающие и размыкающие контакты, которые подвержены быстрому износу. В результате соединения контактов нарушаются, и аппараты, как и сама система, теряют свою работоспособность.

Указанный факт является существенным недостатком релейно-контактных систем. Это обусловило применение бесконтактных аппаратов, которые еще называют логическими элементами.

67 ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ. ДЕЙСТВИЕ УПРАВЛЯЮЩЕЙ СЕТКИ

При появлении объемных зарядов возникает потенциальный барьер, влияющий на значение катодного тока. Высота потенциального барьера регулируется посредством изменения напряжения сетки. Еще одной функцией сетки является применение ее в качестве электростатического экрана, т.е. она представляет собой барьер между катодом и анодом. Максимальное значение действия сетки в качестве электростатического экрана достигается, когда она находится в центре между катодом и анодом.

Одним из важнейших параметров, характеризующих триод, является **коэффициент усиления μ** , который показывает, во сколько раз действие напряжения сетки на анодный ток больше, чем действие напряжения анода.

Величина, обратная коэффициенту усиления, называется **проницаемостью D** :

$$D = \frac{1}{\mu}$$

Если напряжение сетки имеет отрицательное значение, то оно, воздействуя на анодный ток, уменьшает либо прекращает данный анодный ток. Отрицательное напряжение сетки способствует появлению тормозящего поля. Происходит повышение высоты потенциального барьера катода, а следовательно, уменьшается катодный ток. При уменьшении катодного тока до нулевого значения происходит запирание лампы, а напряжение называют запирающим.

68 ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЛАМПЫ

Электронные лампы — электровакуумные приборы с термоэлектронным катодом и электростатическим управлением электронным потоком, служащие для детектирования, генерации и преобразования электрических сигналов.

Триод — трехэлектродная вакуумная лампа с управляющей сеткой, устанавливаемой на участке между анодом и катодом.

Триоды применяются в качестве усилителей и генераторов электромагнитных колебаний. Если анодное напряжение имеет постоянное значение, то анодный ток представляет собой функцию от напряжения сетки:

$$I_a = f(U_c).$$

Если сеточное напряжение имеет постоянное значение, то:

$$I_a = f(U_a).$$

К параметрам триода относят крутизну S , внутреннее сопротивление и коэффициент усиления:

$$S = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \Big|_{U_a = \text{const}}; \quad R_i = \frac{\partial U_a}{\partial I_a} \Big|_{U_c = \text{const}};$$

$$k = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \Big|_{U_a = \text{const}}.$$

В отличие от релейно-контактных систем в устройстве логических элементов отсутствуют движущиеся части и подвижные контакты. Это обуславливает высокую надежность таких систем.

Логический элемент — это устройство с одним или несколькими входами и только одним выходом. Изготовление логических элементов осуществляется на полупроводниковых приборах.

К числу операций, выполняемых с помощью логических элементов, относятся ИЛИ, И, НЕ (НЕТ). Так, при выполнении операции ИЛИ задание сигнала на входе создаст сигнал и на выходе; при выполнении операции И на выходе сигнал появится, когда на всех входах подаются сигналы. При осуществлении операции НЕ (НЕТ) с заданием сигнала на входе пропадет сигнал на выходе.

Если в схему включить электромагнитное реле и логический элемент И, то питание обмотки контактора будет осуществляться только при замкнутом состоянии всех контактов реле; питание обмоток реле осуществляется при замкнутом состоянии всех входных контактов.

Логический элемент И влияет таким образом, что питание к обмотке контактора будет поступать лишь в случае замкнутости контактов на выходе.

Тетрод — четырехэлектродная лампа, включающая экранную сетку, посредством которой снимается проходная емкость. В результате динатронного эффекта на характеристике тетрода выделяется падающий участок.

Пентод — пятиэлектродная лампа, имеющая, помимо экранирующей сетки, дополнительную антидлинатронную сетку, посредством которой устраняется провал на характеристике.

Если в состав электровакуумного прибора ввести дополнительно еще одну сетку, то мы получим устройство, называемое **гексодом**. Гексоды применяют как смесители частот.

$$f_{\text{сум}} = f_1 + f_2$$

где f_1 — частота гетеродина;

f_2 — частота сигнала.

Геттод — семизлектродная лампа, служащая для преобразования частот, а также применяемая в качестве смесительной лампы.

Октод — восьмизлектродная лампа, имеющая шесть сеток и служащая для работы в частотно-преобразовательных устройствах радиоприменения.

Генераторная лампа — электронная лампа, осуществляющая преобразование энергии источника либо постоянного, либо переменного тока в энергию высокой частоты.

Приемно-усилительные лампы — это электронные лампы, служащие в качестве детектирующих устройств, преобразователей частоты и усиления электрических сигналов с частотой до 300 МГц, а также в качестве генераторов электрических колебаний.

В устройство теплового реле включены нагревательный элемент с биметаллической пластиной, обмотка статора. Биметаллическая пластина изготавливается из двух металлических пластин, коэффициенты температурного расширения которых различны. В реле задается ток, по своему значению больше номинального. В результате биметаллическая пластина нагревается, и происходит ее изгиб. Незакрепленный конец пластины поднимается, происходит поворот рычага и размыкание контактов. С помощью специального штифта реле возвращается в первоначальное положение.

Наиболее простая схема управления электроприводами осуществляется следующим образом: с помощью кнопки «Пуск» включается питание катушки контактора, происходит притяжение якоря к сердечнику. Замыканием силовых контактов контактора производится подключение двигателя к сети. Кнопка «Пуск» шунтируется замыканием блокировочного контакта. При нажатии кнопки «Стоп» происходит размыкание цепи, якорь возвращается в исходное положение, и двигатель отключается. Тепловое реле предохраняет двигатель от перегрузок.

Этот процесс характеризуется возвратом всех электронов с катода на анод.

При наличии сеточного напряжения положительного значения возникает ускоряющее поле. Это поле суммируется с полем анода, и происходит уменьшение потенциального барьера за счет результирующего поля. В результате катодный ток увеличивается. При этом происходит притяжение некоторой части электронов сеткой, результатом чего является сеточный ток, не имеющий никакого значения для работы лампы. Величина сеточного тока зависит от густоты сетки: с ее уменьшением снижается и значение сеточного тока.

Выделяются **режимы перехвата и режимы возврата**.

Для режима перехвата характерно превышение значения напряжения анода над напряжением сетки. При данном режиме некоторая часть электронов попадает на сетку, а часть электронов, пролетевших сквозь сетку, направляется к аноду.

Для режима возврата характерно превышение напряжения сетки над напряжением анода. При данном режиме часть электронов, пролетевших сквозь сетку, возвращаются на сетку.

Условие $U_a = 0$ и $U_a > 0$ является условием возникновения второго потенциального барьера. Наличие двух барьеров вызывает максимальный ток сетки.

Таким образом, управляющее действие сетки заключается в контроле анодного тока, т.е. изменении напряжения сетки позволяет получать значения анодного тока в пределах от нуля до некоторого максимального значения.

Электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) представляют собой электронно-лучевой прибор, основанный на создании тонкого пучка электронной, управляемого электрическим и магнитным полями.

Областью применения ЭЛТ является индикаторные устройства радиолокаторов, осциллография, киноскопы, телевидение, различные измерительные приборы и т.д.

Изображения с помощью ЭЛТ получаются на люминесцентных экранах — **электронно-графических**.

Выделяют ЭЛТ, в которых фокусировка электронного луча производится электрическим либо магнитным полем; трубки, характеризующиеся магнитным либо электрическим отклонением луча. ЭЛТ подразделяются на электростатические и магнитные.

Электростатические трубки, в которых фокусировка и отклонение луча производится посредством электрического поля, называются **электростатическими ЭЛТ**.

В устройстве электростатической трубки входит баллон цилиндрической формы с конусным расширением на конце. Люминесцентный экран располагается на внутренней поверхности основания. Выводы катода и подогревателя в некоторых случаях совмещают. Катод окружен модулятором, имеющим цилиндрическую форму и отверстие в доннышке. Также в устройство входят два анода, имеющие цилиндрическую форму.

Внешний фотоэффект — это электронная эмиссия от действия электромагнитного излучения.

К законам фотоэлектронной эмиссии относятся:

- 1) **закон Столетова**. Данный закон утверждает, что фототок от фотоэлектронной эмиссии пропорционален световому потоку:

$$I_e = S\Phi,$$

где S — чувствительность фотокатода;

- 2) **закон Эйнштейна**.

$$h\nu = W_0 + 0,5mv^2,$$

где $h\nu$ — энергия фотона;

W_0 — работа выхода.

Закон Эйнштейна утверждает, что электрон принимает энергию фотона. Данному электрону для выхода из фотокатода необходимо затратить энергию W_0 ;

- 3) **закон красной (длинноволновой) границы**: при уменьшении частоты излучения фотоэлектронная эмиссия остановится, когда значение частоты достигнет величины, равной:

$$h\nu_0 = W_0.$$

При частоте ν_0 длина волны имеет значение

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}.$$

71 ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Полупроводники — это твердые тела, которые находятся в промежуточном положении между проводниками и диэлектриками в зависимости от значения их удельного сопротивления.

Полупроводники характеризуются отрицательным температурным коэффициентом электропроводности, т.е. с увеличением температуры происходит уменьшение сопротивления полупроводников.

Электропроводность полупроводников подразделяется на **электронную** и **дырочную**. Наличие этих двух видов электропроводности в полупроводниковых диодах и лежит в основу принципа их действия.

Электрическая проводимость характеризуется беспорядочным тепловым движением электронов проводимости между атомами кристаллической решетки.

Дырочная электропроводность не свойственна металлам и заключается в том, что один из валентных электронов, который наиболее удален от ядра, уходит в зону проводимости. В итоге в атоме остаются дырки или свободное место. Эти дырки способны перемещаться аналогично положительным зарядам. Перемещение дырок происходит за счет перехода электронов от атома к атому.

При абсолютном нуле полупроводник без каких-либо примесей выступает как диэлектрик. С увеличением температуры увеличивается количество электронов, переходящих из валентной

72 СВОЙСТВА P-N-ПЕРЕХОДА

Электронно-дырочный, или p-n, переход — это некоторая область на границе двух полупроводников с различными типами электропроводности.

На практике чаще всего используют полупроводники с различными примесями. В качестве примесей обычно используют элементы периодической системы Менделеева III, IV и V групп (кремний, германий, сурьма, фосфор, мышьяк).

Применяя примеси V группы, получают полупроводники n-типа. Включая в состав полупроводниковые элементы III группы, получают полупроводники p-типа. При этом возникает избыток дырок. Выделяют полупроводниковые материалы с основными и неосновными носителями.

Свойство p-n-перехода заключается в формировании запирающего слоя. В случае контакта слоев полупроводниковых материалов диффузией носителей создаются нескомпенсированные заряды неподвижных ионов. При этом образуется избыток электронов.

Концентрация неосновных носителей заряда зависит от температуры. Так, ее увеличение приводит к увеличению концентрации неосновных носителей заряда. Это приводит к первоначальному снижению высоты потенциального барьера. Существует некоторое критическое верхнее значение температуры.

Диффузия носителей двух полупроводников с различной электропроводностью приводит к появлению объемных зарядов. В полупроводниках n-типа этот заряд положителен, а в полупроводниках p-типа — отрицателен.

4) закон малой инерционности: отставание фототока от излучения составляет лишь несколько наносекунд.

К фотоэлементам с внешним фотоэффектом относятся **электровакуумные фотоэлементы** и **фотоэлектронные умножители**. Рассмотрим их подробнее.

Электровакуумный фотоэлемент — это диод, на внутреннюю поверхность стеклянного баллона которого нанесен фотокатод, представляющий собой тонкий слой вещества, эмитирующего фотоэлектроны.

С помощью анодных характеристик мы видим выраженный режим насыщения. К этим характеристикам относят:

$$I_{\Phi} = f(\Phi) \text{ при } \Phi = \text{const.}$$

Фотоэлектронный умножитель — электровакуумный прибор, в котором, помимо электронного фотоэлемента, находится устройство, усиливающее фототок путем вторичной электронной эмиссии.

Устройство простейших фотоэлектронных умножителей состоит из фотокатода, диода и анода. Работа ФЭУ осуществляется при анодных токах и световых потоках, имеющих небольшие значения.

При взаимодействии объемных зарядов полупроводников образуется контактная разность потенциалов:

$$U_k = \varphi_n - \varphi_p.$$

В полупроводнике n-типа потенциал имеет положительное значение, а в полупроводнике p-типа — отрицательное. При этом указанные потенциалы имеют одинаковое значение по всей области полупроводника. В процессе p-n перехода образуется потенциальный барьер, сопротивляющийся перемещению носителей. Данный барьер обычно имеет высоту, равную десятой части вольта. Высота потенциального барьера зависит от плотности объемных зарядов: чем она больше, тем высота выше.

Контактная разность потенциалов вызывает перемещение носителей в обратном направлении. Диффузия вызывает упорядоченное движение носителей, т.е. образуется диффузионный ток. Электрическое поле также способно приводить носители в упорядоченное движение. В данном случае образуется ток дрейфа.

В момент, когда токи характеризуются установившимся режимом, наблюдается равенство указанных токов, но их направление противоположно друг относительно друга. Таким образом, суммарный ток p-n-перехода имеет нулевое значение.

P-n-переход влечет за собой изменение концентрации электронов и дырок. Это приводит к появлению обедненного слоя, расположенного в центре перехода. Этот слой называют также запирающим. Он характеризуется наличием большего сопротивления по сравнению с другими объемами полупроводников.

Система катода, модулятора и анода представляет собой электронный прожектор.

Явление свечения люминесцентного экрана происходит за счет возбуждения атомов вещества, из которого изготовлен экран. Атомам экрана передается энергия от ударяемых об него электронов. В результате такого взаимодействия какой-либо электрон удаляется на последнюю орбиту ядра, а при его возвращении происходит выделение кванта лучистой энергии. Такое явление перемещения электрона при соударении называют **катодолуминесценцией**; светящиеся от ударов электронов вещества называют **люминофорами**.

В устройстве магнитных ЭЛТ выделяются модулятор, анод и электронный прожектор с катодом. Для определения магнитодвижущей силы фокусирующей катушки используется формула:

$$F_m = I_m \nu = 240 \sqrt{U_a d / l},$$

где d — средний диаметр катушки;

l — расстояние от катушки до экрана;

U_a — напряжение анода;

ν — число витков катушки.

Анодное напряжение оказывает меньшее воздействие на чувствительность магнитных трубок, чем на чувствительность электростатических. Магнитное поле усиливается посредством замкнутых сердечников, изготовляемых из мягкой стали.

зоны в зону проводимости. Следовательно, происходит увеличение значения электропроводности полупроводника. Это увеличивает количество дырок в валентной зоне, равное количеству электронов, перешедших в зону проводимости.

Носители заряда — это электроны и дырки, посредством движения которых образуется электропроводность.

При перемещении электронов и дырок происходит и процесс **рекомбинации носителей заряда**, т.е. происходит объединение дырок с электронами.

Собственный полупроводник — это полупроводник без примесей. Для него характерно наличие собственной электропроводности.

Концентрация носителей заряда является определяющей характеристикой удельной электропроводности полупроводников. Электрическое поле в полупроводнике создается разностью потенциалов. Полный ток проводимости определим по формуле:

$$I_{\Sigma} = I_{n, \Sigma} + I_{p, \Sigma}.$$

Плотность тока представляет собой сумму плотностей электронного и дырочного токов:

$$J_{\Sigma} = J_{n, \Sigma} + J_{p, \Sigma}$$

или

$$J_{n, \Sigma} = n e v_n.$$

Концентрация и подвижность носителей определяют величину удельной проводимости.

73 УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТОЧЕЧНЫХ ТРИОДОВ

Вакуумные приборы, в устройство которых входит три электрода, называются **триодами**.

В качестве электродов выступают катод, анод и дополнительная управляющая сетка, расположенная между ними. Посредством сетки производится электростатическое управление анодным током.

Сеточное напряжение — это разность потенциалов между сеткой и катодом.

Управляющее действие сетки основано на изменении ее потенциала. Изменяясь, потенциал сетки вызывает изменение электрического поля, а следовательно, и катодного тока лампы. Материалом для изготовления управляющей сетки служит проволока.

Если напряжение сетки имеет отрицательное значение, то оно, воздействуя на анодный ток, уменьшает либо прекращает данный анодный ток. И аналогично если напряжение сетки имеет положительное значение, то при его увеличении увеличивается и анодный, и сеточный токи. При этом происходит процесс распределения тока между сеткой и анодом.

Отрицательное напряжение сетки способствует появлению тормозящего поля. Происходит повышение высоты потенциального барьера катода, а следовательно, уменьшается катодный ток. При уменьшении катодного тока до нулевого значения происходит запаривание лампы, а напряжение называют запарившим. Этот процесс характеризуется возвратом всех электронов с катода на катод.

74 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УСИЛИТЕЛЯ

Усилитель — устройство, которое при подаче на его входные зажимы напряжения U_1 или тока I_1 создает на выходных зажимах напряжение $U_2 = K_u U_1$ или ток $I_2 = k_i I_1$. Здесь коэффициент K_u представляет собой коэффициент усиления по напряжению, а коэффициент K_i — соответственно, по току. Питание усилителей осуществляется при помощи выпрямителей или же аккумуляторов. Усилители подразделяются на однокаскадные и многокаскадные. Такая классификация производится по требуемому коэффициенту усиления. В основе работы усилителей могут лежать установленные насыщенные дроссели (магнитные усилители), либо это могут быть электровакуумные приборы (транзисторные усилители) и микроэлектронные полупроводниковые устройства (усилители на ИМС) и прочие.

Область применения усилителей электрических сигналов является вычислительная техника, автоматика, телевидение, радиосвязь и т. д.

С помощью однокаскадного усилителя производится усиление синусоидального сигнала.

В устройстве указанного усилителя входит, управляемый элемент (УЭ), резистор, подключаемый последовательно к УЭ, и источник постоянного напряжения.

Усиливающее действие устройства осуществляется энергией источника постоянного напряжения. Сопротивление управляемого элемента находится в зависимости от значения входного сигнала.

75 ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ

В процессе усиления различных сигналов происходит некоторое искажение выходного сигнала. Подобные искажения можно характеризовать при помощи таких показателей, как: входные и выходные данные усилителя, коэффициенты усиления по напряжению, по току и по мощности, а также коэффициент полезного действия выходной цепи усилительного устройства.

В устройствах при усилении сигналов могут возникать искажения линейные, частотные, фазовые, переходные, а также собственные шумы усилителя.

Появление линейных искажений обуславливается включением в цепи усилителя конденсаторов и индуктивных катушек, так как их сопротивление и частота взаимосвязаны. Переходные искажения возникают при усилении импульсных сигналов.

К основным характеристикам усилителей относятся амплитудная или передаточная, а также амплитудно-частотная (АЧХ).

Амплитудная характеристика — это зависимость выходного напряжения от входного напряжения.

Амплитудно-частотная характеристика — это зависимость коэффициента усиления по напряжению от частоты входного сигнала.

Если значения напряжения, подаваемого на входе, невелики, то наблюдается линейная зависимость между входным и выходным напряжениями. Если же значения входного напряже-

76 КЛАССЫ УСИЛЕНИЯ

Усилитель — это электронное устройство, посредством которого осуществляется управление потоком энергии, передающейся источником питания нагрузке.

Усилители электрических сигналов можно использовать в вычислительной технике, автоматике, телевидении, радиосвязи и т. д.

Характеристика работы усилителей осуществляется с помощью амплитудной и частотной характеристик. Амплитудная характеристика — это зависимость, при которой после подачи на входе синусоидального напряжения U_1 или тока I_1 выходе получается сигнал в виде напряжения U_2 или тока I_2 . Частотная характеристика — это зависимость коэффициентов усиления от частоты при синусоидальном напряжении на входе.

Классификация усилителей.

1. В зависимости от частоты усиливаемого сигнала:

- 1) усилители низкой частоты. Усиление производится в диапазоне от десятков Гц до сотен КГц;
- 2) широкополосные усилители (до десятков МГц);
- 3) избирательные усилители. Усиливают сигналы, находящиеся в узкой полосе частот.

2. По природе усиливаемого сигнала:

- 1) усилители постоянного тока;
- 2) усилители переменного тока.

3. По классу выполняемых функций:

- 1) усилители напряжения;
- 2) усилители тока;
- 3) усилители мощности.

В случае, когда отсутствует входной сигнал, управляемый элемент пропускает через себя только постоянный ток. Здесь говорят о **режиме покоя** каскада, так как не происходят колебания анодного тока. Значение анодного тока определяется формулой:

$$I_a = I_{a0} + I_{am} \sin \omega t.$$

Напряжение на нагрузке найдем из выражения:

$$U_a = U_{a0} + U_{am} \sin \omega t.$$

Выходное напряжение усилителя представляет собой переменное анодное напряжение.

Бывают случаи, когда в усилителях используют автоматическое смещение. При этом источник является своеобразным поставщиком смещения напряжения:

$$E_g = I_{a0} R_{g1}.$$

Когда источнику колебаний присуще постоянное напряжение, производится подача колебаний на сетку. Это осуществляется с помощью разделительного конденсатора. Напряжение смещения передается на сетку через резистор высокого сопротивления.

Применение резистора с высоким сопротивлением для усилительного каскада позволяет устранить искажения от действия сеточного тока.

Когда источник колебаний имеет постоянное напряжение, применяют трансформаторы или разделительные конденсаторы, предотвращающие его попадание на сетку.

В зависимости от класса выполняемых функций усилителя оценивают с помощью коэффициента усиления по напряжению, по току и по мощности соответственно.

$$K_U = \frac{U_{am}}{U_m}; K_I = \frac{I_{am}}{I_m}; K_P = \frac{P_{am}}{P_m}.$$

В устройство усилителя может быть включено несколько каскадов. В этом случае усилитель называют **многокаскадным**, и его оценка ведется с помощью коэффициента усиления, определяемого как произведение коэффициентов усиления всех каскадов, входящих в устройство усилителя:

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n$$

Если в состав усилителя включают реактивные элементы, а усилительные элементы являются инерционными, то коэффициент усиления рассчитывается в комплексной форме:

$$K_U = K_U \cdot e^{j\varphi},$$

где φ — сдвиг фаз между U_m и U_{am} .

Коэффициент полезного действия усилительных устройств рассчитывают по формуле:

$$\eta = \frac{P_{ам}}{P_{вт}},$$

где $P_{вт}$ — мощность источника энергии, потребляемая усилителем.

При наличии сеточного напряжения положительного значения возникает ускоряющее поле. Это поле суммируется с полем анода, и происходит уменьшение потенциального барьера за счет результирующего поля. В результате катодный ток увеличивается. При этом происходит притяжение некоторой части электронов сеткой, результатом чего является сеточный ток, не имеющий низкого значения для работы лампы. Величина сеточного тока зависит от густоты сетки: с ее уменьшением снижается и значение сеточного тока.

В состав триода входят цель накала, цель анода и цель сетки. Цель сетки включает в себя промежуток катод-сетки и источник напряжения E_g .

Основным током, выполняющим полезную работу в триоде, является анодный ток.

Ток в проходе катода определяется как сумма анодного и сеточного токов:

$$I_k = I_a + I_g$$

Для триодов характерна односторонняя проводимость. Управляющая сетка триодов позволяет использовать их в качестве усилителей электрических колебаний и генераторов электрических колебаний с различными значениями частоты.

ния большие, то выходное напряжение вообще не зависит от входного. В первом случае мы наблюдали постоянство коэффициента усиления, а во втором случае мы сталкиваемся с такой зависимостью: чем больше значение входного напряжения, тем меньше коэффициент усиления.

В случае линейной зависимости входного и выходного напряжений коэффициент усиления является **коэффициентом пропорциональности**.

Изменение значений входного и выходного напряжений осуществляется по синусоидальному закону. Режим работы усилителя при этом называют **линейным режимом**.

При больших значениях входных напряжений присутствуют искажения синусоидального закона, т.е. присутствует не только частота входного сигнала, но еще и гармонические составляющие.

Этот факт способствует искажению линейного режима, производится выделение определенного диапазона частот, называемого **рабочим**.

Наличие этого диапазона объясняется присутствием конденсаторов в устройстве усилителя.

Обратная связь — это процесс передачи информации с выхода устройства на его вход.

Применение обратной связи позволяет, проанализировав показатели на выходе, отредактировать их на входе необходимым образом и, если требуется, задать какие-либо новые свойства устройства.

Обратная связь также задает сигнал на входе, в результате чего общий входной сигнал представляет собой сумму входного сигнала (задаваемого напряжение) и сигнала от обратной связи:

$$\dot{U}_r = \dot{U}_{in} + \dot{U}_{oc} \quad (1)$$

Разделив обе части уравнения (1) на величину напряжения на выходе \dot{U}_{out} , получим:

$$\frac{1}{K_U} = \frac{1}{K_{oc}} + K_U$$

где $K_U = \frac{\dot{U}_{out}}{\dot{U}_r}$ — коэффициент усиления собственного усилителя;

$K_{oc} = \frac{\dot{U}_{oc}}{\dot{U}_{out}}$ — коэффициент усиления усилителя с обратной связью;

На рисунке 17 представлено схематическое изображение двухтактного усилителя мощности.

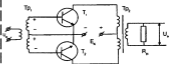


Рис. 17. Пример двухтактного усилителя мощности

На вторичной обмотке трансформатора T_1 имеется отвод от средней точки. Этот отвод выполняется таким способом, чтобы на базы транзисторов подавались мгновенные напряжения, имеющие полярность, противоположную полярности средней точки.

В процессе усиления выделяются два последовательных этапа: на первом этапе, соответствующем положительному полупериоду, происходит усиление сигнала одним транзистором T_1 ; на втором этапе в процесс усиления подключается другой транзистор, а действие первого прекращается. Второй этап соответствует отрицательному полупериоду.

Токи транзисторов протекают в противоположных друг другу направлениях. В результате

Схематично усилитель мощности имеет вид, представленный на рисунке 18. Такие усилители подключаются к выходом многокаскадных усилителей. Многокаскадные усилители при этом должны иметь большую мощность. В устройстве усилителя мощности имеется транзистор, который пропускает через себя токи больших значений.

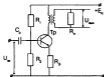


Рис. 18. Усилитель мощности на полупроводниковых триодах

Как и в любом устройстве, в усилителях происходят потери мощности, уменьшить которые можно, включая в коллекторную цепь первичную обмотку трансформатора. Посредством данного трансформатора выходной сигнал передается в нагрузку.

Если изменить схему каскада, то изменятся ход линии нагрузки, соответствующих выходной характеристике трансформатора, подклю-

Автогенератор — устройство, основанное на автономных автоколебательных цепях, в которых напряжение и ток изменяются периодически и без задания дополнительного сигнала на вход.

RC-генераторы представляют собой автогенераторы, включающие в состав резонансные цепи RC. Возбуждение автогенератора достигается посредством приложения петлевого усиления, значение которого больше единицы. В процессе работы генератора амплитуда колебаний увеличивается, что приводит к уменьшению коэффициента усиления. Процесс стабилизации амплитуды колебаний наблюдается при $K_U = 1$.

Форма выходного напряжения в генераторах типа RC аналогична форме тока от усиления. Значение коэффициента полезного действия таких генераторов достаточно мало.

Автогенераторы подключают к цепи, имеющей обратную связь усилителя. Частоту колебаний находят с помощью уравнения:

$$\omega_c CR - \frac{1}{\omega_c CR} = 0.$$

Тогда:

$$\omega_c = \frac{1}{RC}.$$

изменения направления этих токов в течение каждого из полупериодов входного сигнала в выходном трансформаторе компенсируются практически все гармонические составляющие. Исключением здесь является гармоника с частотой колебаний, равной частоте входного сигнала.

Ток, который потребляется двухтактной схемой, имеет составляющую, которая равна значению тока транзисторов:

$$I_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi I_{\text{ан}} \sin \alpha d\alpha = \frac{2}{\pi} I_{\text{ан}}$$

КПД усилителя, изображенного на рисунке 17, определяется с помощью следующего выражения:

$$\eta = \frac{0,5 U_{\text{ан}} U_{\text{ан}}}{I_0 E_s} = 0,25 \pi \frac{U_{\text{ан}}}{E_s}$$

В двухтактном усилителе нет нужды бороться с мощными гармониками, а ферритовый трансформатор прекрасно справляется с трансформацией выходного сопротивления анодной цепи к фиксированному сопротивлению фидера. К тому же, уровни мощности, на которых работают современные усилители таковы, что говорить об использовании антенн со случайным волновым сопротивлением не приходится. Поэтому, заманчиво было бы вообще отказаться от фильтрации в выходной цепи, и если бы не другие внеполосные излучения, помимо гармоник, реальная схема усилителя могла бы заканчиваться широкополосным трансформатором.

Этой частоте соответствует коэффициент

$$\gamma = \frac{1}{3}. \text{ Следовательно, в момент стабилизации}$$

амплитуды колебаний коэффициент усиления усилителя должен быть равен 3. Для выполнения условия баланса фаз необходимо, чтобы $\varphi_{\text{ан}} = 0$. При этом частота имеет значение ω_3 . Цель отрицательной обратной связи применяется для достижения баланса амплитуд, т.е. для стабилизации амплитуды колебаний. Если резисторы цепи обратной связи обозначить через R_1 и R_2 , то коэффициент усиления напряжения при балансе амплитуд равен:

$$K_v = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 3.$$

Один из резисторов цепи обратной связи является терморезистором, который, нагреваясь при работе автогенератора, способствует увеличению глубины отрицательной обратной связи. В результате коэффициент усиления достигает значения единицы, и наблюдается баланс амплитуд.

В случае применения фазосдвигающей цепи с лестничной структурой частота автоколебаний на выходе сдвигается по фазе на 180° . Соблюдение условия $\varphi_{\text{ан}} = 0$ достигается путем подключения фазосдвигающей цепи к инвертирующему входу ОУ.

$$K_v = \frac{U_{\text{ос}}}{U_{\text{ан}}} - \text{коэффициент передачи напря-$$

жения.

Таким образом, коэффициент усиления усилителя с обратной связью определяется по формуле:

$$K_{\text{осс}} = \frac{K_v}{1 - K_v \beta_v}$$

Суммирование входного напряжения и напряжения обратной связи на входе может производиться как в фазе, так и в противофазе. Если суммирование производится в фазе, то между напряжениями стоит знак «плюс». Когда обратная связь положительна, коэффициент усиления превышает коэффициент усиления собственного усилителя, и выполняется условие:

$$1 > K_v \beta_v > 0.$$

Стационарному генераторному режиму соответствует равенство $K_v \beta_v = 1$. Для нестационарного генераторного режима характерно: $K_v \beta_v > 1$.

При $K_v \beta_v < 0$ обратная связь имеет отрицательное значение, т.е. коэффициент усиления собственного усилителя превышает коэффициент усиления.

ченного в коллекторную цепь. Так как выходная цепь имеет незначительное сопротивление, то линия нагрузки постоянного тока и ось коллекторного тока расположены друг относительно друга под прямым углом.

Для того чтобы определить, под каким углом располагается линия нагрузки переменного тока, необходимо найти коэффициент трансформации трансформатора, сопротивление его обмоток с сопротивлением нагрузки. Как уже упоминалось, сопротивление обмоток трансформатора мало и, следовательно, не оказывает существенного влияния. С учетом сказанного формула определения сопротивления нагрузки выхода транзистора по переменному току имеет вид:

$$R_n = n^2 R_{\text{ан}}$$

где n — коэффициент трансформации трансформатора.

Выходная мощность определяется:

$$P_{\text{ан}} = \frac{I_{\text{ан}} U_{\text{ан}}}{2}$$

КПД усилителя мощности:

$$\eta = \frac{P_{\text{ан}}}{I_0 E_s}$$

81 ГЕНЕРАТОРЫ С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТРИОДАХ

Автогенераторы классифицируются следующим образом.

1. Генераторы импульсов:

- 1) генераторы напряжения прямоугольной формы;
- 2) генераторы напряжения экспоненциальной формы;
- 3) генераторы линейно изменяющегося напряжения;
- 4) генераторы напряжения треугольной формы;
- 5) генераторы ступенчато изменяющегося напряжения;
- 6) блокинг-генераторы.

2. Генераторы синусоидальных колебаний:

- 1) LC-автогенераторы;
- 2) RC-автогенераторы;
- 3) генераторы с кварцевой стабилизацией частоты;
- 4) генераторы с электромеханическими резонансными системами стабилизации частоты.

Если необходимо получить генератор периодически изменяющегося напряжения, то из устройства исключается обратная связь.

Цепи обратной связи генераторов синусоидального напряжения характеризуются наличием резонансных свойств. Возникновение колебаний в связи с этим происходит на одном определенном значении частоты.

Возбуждение генераторов может происходить в мягком и жестком режимах. Для мягкого

82 ГЕНЕРАТОРЫ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ НА ВИННЫХ

К генераторам низкой частоты относятся RC-генераторы гармонических колебаний. Они не очень удобны в применении, так как имеют большие габаритные размеры катушек индуктивности. Это привело к необходимости использования RC-цепей в положительной обратной связи.

Характеристики таких генераторов являются квазирезонансными. Выходное напряжение сдвигается по фазе относительно входного на 180° или же на 0.

В цепи, включающей в себя три фазосдвигающих звена, выходное напряжение сдвигается относительно входного напряжения на 180° .

Если мы используем цепь Вина, то сдвиг фаз между входным и выходным напряжениями не наблюдается.

В устройство моста Вина входят: звено, имеющее последовательное соединение RC; звено, имеющее параллельное соединение RC. Сопротивления этих звеньев определяются:

$$Z_1 = R + \frac{1}{j\omega C} = \frac{1 + j\omega CR}{j\omega C};$$

$$Z_2 = \frac{R}{1 + j\omega C R}.$$

83 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Выпрямительное устройство — устройство, преобразующее энергию переменного тока в энергию постоянного тока (потребители энергии переменного тока, генераторы постоянного тока).

Основными устройствами, применяемыми для выпрямления тока, являются полупроводниковые диоды. Такой выбор обоснован их хорошей проводимостью в прямом направлении.

В схеме выпрямителя выделяются генератор переменной ЭДС e , диод D и резистор с нагрузкой R_n , соединенные между собой последовательно. Такая схема носит название **однополупериодной**.

Силовой трансформатор выполняет функцию питания РЗА генератором переменной ЭДС.

Если производится выпрямление тока с высокой частотой, то в качестве генератора переменной ЭДС выступает либо трансформатор с высокой частотой, либо резонансный колебательный контур. В качестве нагрузки подключается резистор, характеризующийся высоким значением сопротивления.

Рассмотрим процесс работы простейшего выпрямителя.

ЭДС генератора подчиняется синусоидальному закону:

$$e = E_m \sin \omega t.$$

За один полупериод через диод проходит ток, действие которого вызывает падение напряже-

84 СТАБИЛИЗАТОР ТОКА

На значения различных параметров транзисторов значительное влияние оказывает температура. При ее повышении сильно возрастают значения токов, а это, в свою очередь, ведет к сбоям в работе транзисторов. Для устранения подобных явлений применяются специальные стабилизаторы, за счет которых режим работы остается более стабильным, в меньшей степени зависящим от температуры. Влияние температуры на транзисторы не устраняется, но последствия данного явления значительно сглаживаются.

Выделяется несколько схем стабилизации, одной из которых является **коллекторная стабилизация**. В схему коллекторной стабилизации включается смещающий напряжение на базе резистор, подключаемый к коллектору. Такая система позволяет сохранять значение тока I_c на постоянном уровне. Достоинствами подобной схемы являются ее экономичность и простота.

Однако стабилизация эффективна лишь в случае, когда половина напряжения на входе падает на резисторе.

Помимо коллекторной стабилизации, пользуются методом **эмиттерной стабилизации**. В этом случае источник должен иметь напряжение, превышающее аналогичное значение при коллекторной стабилизации.

В качестве стабилизирующего в схеме эмиттерной стабилизации используется резистор провода эмиттера R_e .

Для определения коэффициента передачи звена положительной обратной связи используют выражение:

$$\beta = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{1}{1 + Z_1/Z_2}$$

или

$$\beta = \frac{j\omega CR}{1 - \omega^2 C^2 R^2 + 3j\omega CR}$$

Нулевой угол сдвига между входным и выходным напряжениями будет наблюдаться при условии $1 - \omega^2 C^2 R^2 = 0$. Частота генератора при этом равна:

$$\omega = (CR)^{-1/2}$$

Возникает необходимость стабилизации амплитуды колебаний. Это достигается использованием нелинейной отрицательной обратной связи. Также способом стабилизации является применение полевого транзистора с р-п-переходом.

Снижение усиления достигается путем увеличения глубины отрицательной обратной связи. Обратная связь увеличивается через увеличение сопротивления транзистора, вызванного повышением значения выходного напряжения генератора.

Напряжение смещения базы в этом случае определяется как:

$$U_{B-X} = U_2 - U_3,$$

где U_3 — напряжение на резисторе;

U_2 — напряжение источника.

Эмиттерная стабилизация со схемой делителя обеспечивает постоянные значения токов за счет их изменения в противоположные стороны одновременно.

В состав схемы включается также и конденсатор C_2 , шунтирующий резистор R_2 . Напряжение делителя выбирает в соответствии с формулами:

$$R_1 = (E_1 - U_2) / (I_{B1} + I_{B2});$$

$$R_2 = U_2 / I_{B1}; R_3 = \frac{U_2}{I_{B2}}.$$

Критерием выбора напряжения является возможность увеличения значения. Значение тока делителя должно находиться в пределах .

режима должно выполняться условие $|K_1| > 1$ при включении источника энергии. Цепь обратной связи применяется для передачи различных сигналов от случайных факторов на вход усилителя. Фазы данных сигналов и входных сигналов одинаковы. Дополнительный сигнал от обратной связи превышает в значительной степени величину вызвавшего его возмущения. Таким образом, с увеличением входного сигнала увеличивается напряжение на выходе, а увеличение сигнала на выходе способствует увеличению сигнала на входе с помощью обратной связи. Выходное напряжение растет лишь до определенного уровня. В момент, когда коэффициент усиления становится равным единице, амплитуда колебаний приобретает постоянное значение.

Условием возникновения автоколебаний при жестком режиме является применение внешнего сигнала. Данное условие обусловлено наличием нелинейных свойств усилителя.

При подаче напряжения от источника энергии, когда автоколебаний еще нет, значение коэффициента усиления $|K_1| < 1$. Для достижения условия $|K_1| > 1$ применяют дополнительный электрический сигнал. Амплитуда автоколебаний увеличивается до определенного значения, соответствующего амплитудному равновесию ($|K_1| = 1$).

ния u_a на R_a резисторе. Напряжение при этом прямое. Следующий полупериод характеризуется наличием обратного напряжения и параметрами:

$$i \approx 0; u_a = 0.$$

Следовательно, ток представляет собой импульсы, время которых равно одному полупериоду. Такой ток носит название **выпрямленного тока**.

Выпрямленный ток способствует возникновению выпрямленного напряжения. Катод диода соответствует положительному полюсу, анод — отрицательному.

Если подается напряжение, имеющее отрицательную полярность, то диод характеризуется следующими значениями параметров:

$$i \approx 0; u_a = 0.$$

Выпрямленное напряжение подвержено сильной пульсации, для сглаживания которой используются сглаживающие фильтры. В устройстве сглаживающего фильтра входит конденсатор с большой емкостью. Для нагрузки от переменной составляющей в некоторых случаях применяют дроссели. Таким образом, эффективность сглаживающего фильтра повышается с увеличением частоты пульсаций.

Условием эффективного сглаживания для конденсатора является:

$$\frac{1}{\omega C} \ll R_{\text{н}}$$

85 СТАБИЛИЗАТОР ПОСТОЯННОГО НАПЯЖЕНИЯ

Нормальный режим работы транзистора требует выполнения условия, при котором наблюдается постоянное напряжение между эмиттером и базой. Такое напряжение называют **напряжением смещения базы**.

Между эмиттером и базой при прохождении тока эмиттера возникает падение напряжения. Однако его значение слишком мало для обеспечения нормального режима работы. Это приводит к необходимости применения резистора или делителя, которые и создают смещение напряжения. При подаче смещения на базу с помощью резистора этим резистором гасится большая часть напряжения на входе. Падение напряжения происходит также между эмиттером и базой. Это значение невелико и определяется по формуле:

$$U_{\text{э-б}} = E_2 - I_{\text{э}} R,$$

где E_2 — напряжение на входе.

Резистор, гасящий напряжение, подбирается таким образом, чтобы значение его сопротивления соответствовало:

$$R = (E_2 - U_{\text{э-б}}) / I_{\text{э}}.$$

Часто значения напряжения на участке база — эмиттер во много раз меньше напряжения на входе E_2 . В этом случае:

$$R \approx \frac{E_2}{I_{\text{э}}}.$$

86 АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ

Модуляция — процесс, в ходе которого осуществляется отображение информационного сигнала в одном из параметров другого колебания, используемого как переносчик информации.

В процессе модуляции информационный сигнал называют **модулирующим**. Переносчик информации, участвующий в модуляции, называют **несущим**.

Для случая гармонического колебания:

$$u(t) = U_m \cos(\omega_c t + \varphi_0), \quad (1)$$

где U_m — амплитуда колебания;

ω_c — угловая частота;

φ_0 — начальная фаза.

Модуляция подразделяется на амплитудную (АМ), частотную (ЧМ) и фазовую (ФМ). Изменение параметров каждого из видов модуляции подчиняется закону **информативного сигнала**.

Информативный сигнал — любой вид электрического сигнала, участвующего в процессе.

Формула для определения гармонического модулирующего сигнала имеет вид:

$$u(t) = U_{\text{мд}} \cos \Omega t, \quad (2)$$

где $U_{\text{мд}}$ — амплитуда гармонического модулирующего сигнала;

Ω — частота гармонического модулирующего сигнала.

87 РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН РАЗЛИЧНЫХ ДЛИН

На скорость распространения волн оказывают влияние инерция и упругость среды.

В общем, волны распространяются по синусоидальному либо по косинусоидальному закону. При этом должно выполняться условие отсутствия потери.

Однако на практике чаще всего необходимо учитывать возникающие в процессе распространения волны потери. В результате вместо указанных законов распространения волн мы получаем осциллирующее решение волнового уравнения. Постепенно в зависимости от времени и расстояния происходит затухание волн.

Если удельная проводимость среды $\sigma = 0$, то волновое уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2}.$$

Если удельная проводимость среды $\sigma \neq 0$, то плотность тока определяется:

$$J = \frac{I}{\text{площадь}} = \frac{I}{R \cdot \text{длина}} \cdot \frac{V}{\text{длина}} = \sigma E,$$

где E — электрическое поле.

88 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАДИОСВЯЗИ

Когда мы слушаем радио, мы не задумываемся о том, как передаются различные звуки и речь на расстояние. Этот процесс представляет достаточно длинную цепочку преобразований. Так, первоначально звуковые колебания превращаются в электрические, затем в электромагнитные волны и лишь на последнем этапе — снова в звуковые сигналы.

Звуковые колебания — колебания с низкой частотой, имеющие значения в интервале от 30 до 16 000 Гц. Такие колебания способны распространяться в пространстве на 15—10 000 км.

В электромагнитные волны преобразуются посредством антенны. Длина антенны должна быть приближена к длине волны передаваемого сигнала. Как видно из указанного интервала длины волны звуковых сигналов, применение таких антенн нецелесообразно.

На практике в радиосвязи длина волны передаваемого звукового сигнала должна укладываться в интервале до нескольких километров. Возникновению электромагнитных волн способствуют колебания с частотой, большей частоты звуковых колебаний.

При преобразовании звукового сигнала в электромагнитные волны производят коррекцию амплитуды, частоты и фазы тока высокой частоты звуковых колебаний. Это так называемый процесс модуляции.

В устройстве радиопередающих приборов входит генератор высокочастотных колебаний, модулятор и антенна. С помощью антенны элек-

Рассмотрим случай амплитудной модуляции (АМ).

$$u_{AM}(t) = [U_m + a(t)] \cos \omega_0 t. \quad (3)$$

При гармоническом колебании формула (3) примет вид:

$$u_{AM}(t) = (U_m + U_{mod} \cos \Omega t) \cos \omega_0 t = U_m (1 + m_{AM} \cos \Omega t) \cos \omega_0 t, \quad (4)$$

где $m_{AM} = \frac{U_{mod}}{U_m}$ — коэффициент амплитуд-

ной модуляции.

В силу того, что модуляция — процесс нелинейный, в выходном сигнале различают спектральные составляющие, отсутствующие во входном сигнале. Для АМ спектр модулированного сигнала определяют по формуле:

$$u_{AM}(t) = U_m (1 + m_{AM} \cos \Omega t) \cos \omega_0 t = U_m \cos \omega_0 t + \frac{m_{AM} U_m}{2} \cos(\omega_0 - \Omega) t + \frac{m_{AM} U_m}{2} \cos(\omega_0 + \Omega) t \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что в состав выходного сигнала вошли новые сигналы, имеющие частоту $\omega_0 - \Omega$ и $\omega_0 + \Omega$.

Промежные волны преобразуются в электрические. Для того чтобы приемник сигнала ловил одну частоту определенного радио, в устройстве включаются колебательные контуры.

Также в устройствах применяются детекторы, посредством которых высокочастотные колебания контура преобразуются в ток и напряжение. На последней стадии обработанный сигнал поступает в оконечное устройство. В результате человек сможет прослушать и воспринять полученный сигнал.

В радиосвязи применяются **длинные, средние, короткие и ультракороткие волны**.

Длинные волны — волны, имеющие длину более 1000 м. При этом земная поверхность поглощает незначительную часть волны, а большая ее часть поглощается ионосферой.

Средние волны — волны с длиной от 1000 до 100 м. Здесь передача на большие расстояния осуществляется с помощью интенсивного отражения пространственного луча от ионосферы.

Короткие волны — волны с длиной от 100 до 10 м. Передача осуществляется также за счет высокого отражения от ионосферы.

Ультракороткие волны — волны с длиной, измеряемой несколькими метрами, сантиметрами либо дециметрами. Их применение ограничено, так как дальность передачи сигнала сильно сокращается. Их использование в практической деятельности обусловлено лишь отсутствием взаимных помех радиостанций, расположенных между собой на сравнительно небольших расстояниях.

Если в качестве способа смещения напряжения применяется делитель $R_1 R_2$, то падение напряжения E_2 происходит на резисторе R_1 , а напряжение участка база — эмиттер падает на резисторе R_2 . Резистор R_2 соединен с транзистором параллельно. Сопротивления делителя определяют по формулам:

$$R_1 = (E_2 - U_{э-к}) / (I_A + I_{э0}) \approx E_2 / (I_A + I_{э0}); \\ R_2 = U_{э-к} / I_A,$$

где I_A — ток делителя.

При использовании делителя для смещения напряжения в источнике формируется ток $I_{э0}$, приводящий к нагреву резисторов R_1 и R_2 , а сопротивлением R_2 уменьшается входное сопротивление каскада. Все это приводит к неэффективности метода применения делителя.

На практике значение дополнительного тока $I_{э0}$ превышает $I_{э0}$ всего в 3–5 раз. При этом в устройстве включают конденсатор C_p , передающий усиливаемое переменное напряжение на транзистор. Условием выбора емкости конденсатора является:

$$\frac{1}{\omega_p C_p} < R_m,$$

где $\frac{1}{\omega_p C_p}$ — сопротивление на самой низкой частоте.

Если одновременно мы наблюдаем и ток смещения, и ток проводимости, то можем записать второе уравнение Максвелла в виде:

$$\nabla H = \frac{\partial D}{\partial t} + J,$$

или

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial E_z}{\partial t}.$$

Для определения фазовой скорости волны применяется выражение:

$$\theta = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega}{(\omega \mu \epsilon / 2)^{1/2}} = \omega \epsilon = \left(\frac{2\omega}{\mu \sigma} \right)^{1/2} = v \lambda_c,$$

где λ_c — длина волны излучения в проводнике. Длина волны определяется как:

$$\lambda_c = 2\pi \delta.$$

Электромагнитные волны представляют собой поперечные волны. Для плоской волны, решающей волновое уравнение, получим:

$$E_x = E_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} (\delta t - z), \quad H_y = H_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} (\delta t - z),$$

где E_0, H_0 — амплитуды электрического и магнитного поля соответственно.