

Содержание

1. Классификация электрических цепей. Понятие о двухполюсниках. Спротивление проводников	5
2. Использование законов Ома и Кирхгофа при расчете и анализе электрических цепей	5
3. Электрические цепи с одним источником энергии и пассивными элементами. Простейшая цепь с одним приемником	5
4. Электрические цепи с последовательным соединением резистивных элементов	7
5. Электрические цепи с параллельным соединением резистивных элементов	7
6. Электрические цепи, содержащие соединения резистивных элементов треугольником	7
7. Понятие об источнике тока	9
8. Метод законов Кирхгофа. Метод контурных токов	9
9. Метод узлового напряжения	9
10. Метод наложения	11
11. Метод эквивалентного генератора	11
12. Получение синусоидальной ЭДС. Основные соотношения	11
13. Цепь, содержащая катушку с активным сопротивлением r и индуктивностью L	13
14. Цепь, содержащая резистивный и емкостной элементы	13
15. Последовательное соединение r, L, C	13
16. Активная, реактивная и полная мощности цепи	15
17. Резонанс напряжений	15
18. Резонанс токов	15
19. Способы соединения фаз источников и приемников. Положительные направления ЭДС, напряжений и токов	17
20. Соотношения между фазными и линейными напряжениями источников. Номинальные напряжения	17
21. Соединения приемников звездой	17
22. Соединения приемников треугольником	19
23. Устройство и принцип действия магнитных устройств	19
24. Понятие о двухтактных и трехтактных магнитных устройствах	19
25. Магнитоэлектрическая система	21
26. Электромагнитная система	21
27. Электродинамическая система	21
28. Погрешности измерений электроизмерительных приборов	23
29. Измерение тока	23
30. Измерение напряжения	23
31. Измерения мощности	25
32. Измерение сопротивлений	25
33. Электронно-лучевой осциллограф	25
34. Назначение, устройство и принцип действия трансформатора	27
35. Трехфазные трансформаторы	27
36. Потери мощности и КПД трансформатора	27
37. Назначение и устройство машин постоянного тока	29
38. Принцип действия генератора и двигателя	29
39. ЭДС якоря и электромагнитный момент машин постоянного тока	29
40. Явление коммутации в машинах постоянного тока	31
41. Классификация генераторов постоянного тока по способу возбуждения. Схемы включения генераторов	31
42. Пуск двигателей	31
43. Тормозные режимы работы двигателей	33
44. Потери мощности и КПД машин постоянного тока	33
45. Устройство асинхронного двигателя трехфазного тока	33
46. Принцип действия асинхронного двигателя	35
47. Вращающееся магнитное поле	35
48. ЭДС, частота тока ротора, скольжение	35

49. Электромагнитная мощность и потери в асинхронном двигателе	37
50. Момент, развиваемый двигателем	37
51. Механическая характеристика асинхронного двигателя	37
52. Паспортные данные двигателя. Расчет и построение механической характеристики	39
53. Пуск асинхронных двигателей	39
54. Энергетические показатели асинхронного двигателя	39
55. Асинхронный тахогенератор	41
56. Вращающийся трансформатор	41
57. Понятие о линейном трехфазном асинхронном двигателе	41
58. Назначение и устройство синхронных машин	43
59. Принцип действия генератора	43
60. Принцип действия двигателя	43
61. Схема включения и основные зависимости синхронного генератора	45
62. Векторные диаграммы синхронного генератора	45
63. Основные характеристики синхронного генератора	45
64. Векторные диаграммы синхронного генератора	47
65. Угловая и механическая характеристика синхронного двигателя	47
66. Пуск синхронного двигателя	47
67. Аппаратура автоматического управления и простейшие схемы управления электроприводами	49
68. Бесконтактные системы управления	49
69. Трехэлектродные лампы. Действие управляющей сетки	49
70. Электроизмерительные лампы	51
71. Электронно-лучевые трубки	51
72. Фотозлементы с внешним фотоэффектом	51
73. Электропроводность полупроводников	53
74. Свойства р-п-перехода	53
75. Устройство и принцип действия точечных триодов	53
76. Принцип действия усилителя	55
77. Характеристики усилителей	55
78. Классы усиления	55
79. Виды обратной связи. Усилитель напряжения	57
80. Двухтактные усилители мощности	57
81. Усилители мощности на полупроводниковых триодах	57
82. Генераторы гармонических колебаний типа RC	59
83. Генераторы с самовозбуждением на полупроводниковых триодах	59
84. Генераторы низкой частоты на биепиях	59
85. Принцип действия выпрямительного устройства	61
86. Стабилизатор тока	61
87. Стабилизатор постоянного напряжения	61
88. Амплитудная модуляция	63
89. Распространение электромагнитных волн различных длин	63
90. Основные положения радиосвязи	63

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ. ПОНЯТИЕ О ДВУХПОЛЮСНИКАХ. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

При анализе электрических цепей важно знать только параметры и способ соединения друг с другом. Активные элементы будем обозначать в основном кружочками со стрелками внутри, указывающими направление ЭДС (рис. 1); для батареи из гальванических элементов используем обозначение, приведенное на рис. 1б.

В сопротивлениях различных элементов электрических цепей происходит процесс преобразования электрической энергии в теплоту. Такие элементы называются резистивными и обозначаются прямоугольниками (см. рис. 1).

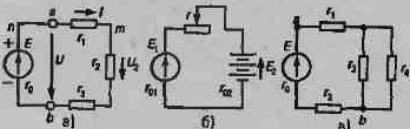


Рис. 1. Примеры схем электрических цепей

Электрические цепи постоянного тока (как и переменного) и, соответственно, их электрические схемы бывают весьма разнообразными. Так, встречаются электрические цепи неразветвленные (рис. 1а и 1б) и разветвленные (рис. 1в), с одним активным элементом (рис. 1а), с двумя (рис. 1б) или с большим количеством активных элементов, линейные и нелинейные.

Линейной называется электрическая цепь, параметры которой не зависят от напряжений или токов в цепи. Если параметр хотя бы одного из элементов не остается постоянным при изменении напряжений или токов в цепи, то данный элемент и вся электрическая цепь называются **нелинейными**.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАКОНОВ ОМА И КИРХГОФА ПРИ РАСЧЕТЕ И АНАЛИЗЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Согласно закону Ома в замкнутой неразветвленной электрической цепи (рис. 2):

$$I = \frac{E}{r_0 + r_1 + r_2 + r_3} \quad (1)$$

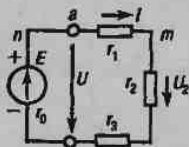


Рис. 2. Незамкнутая электрическая сеть

А в любом пассивном элементе цепи, например с сопротивлением r_2 ,

$$I = \frac{U_2}{r_2} \quad (2)$$

Выражение (1) справедливо при совпадающих направлениях ЭДС E и тока I , а выражение (2) — при совпадающих направлениях напряжения U и тока I , что и следует учитывать при нанесении на схеме стрелок, указывающих положительные направления в случае использования закона Ома.

Согласно **первому закону Кирхгофа** алгебраическая сумма токов ветвей, соединенных в любой узловой точке электрической цепи, равна нулю, т. е.

$$\sum I = 0 \quad (3)$$

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

Рассмотрим простейшую неразветвленную электрическую цепь (рис. 3). В этой цепи участок amb представляет собой простейший пассивный двухполюсник, являющийся приемником электрической энергии, участок alb — простейший активный двухполюсник, являющийся источником.

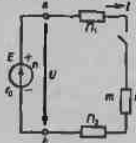


Рис. 3. Схема простейшей электрической цепи

Для рассматриваемой электрической цепи по второму закону Кирхгофа можно написать:

$$E = I r_0 + I r; \quad (1)$$

$$E = I r_0 + U. \quad (2)$$

Из приведенных уравнений нетрудно получить формулу для определения тока и соотношение между напряжением и ЭДС источника:

$$I = \frac{E}{r_0 + r} = \frac{E}{r_M}; \quad (3)$$

$$U = E - I r_0. \quad (4)$$

где $r_M = r_0 + r$ — эквивалентное сопротивление цепи.

При неизменных значениях ЭДС E и внутреннего сопротивления r_0 ток в цепи зависит от сопротивления r приемника. Напряжение источника U (равное в данной цепи напряжению приемника) меньше его

ЭДС на падение напряжения $I r_0$ во внутреннем сопротивлении источника.

Если умножить (1) и (4) на ток, получим соотношения между мощностями:

$$EI = I^2 r_0 + I^2 r, \quad (5)$$

$$UI = EI - I^2 r_0. \quad (6)$$

Правая часть (5) содержит потери мощности во внутреннем сопротивлении $I r_0$ и мощность, потребляемую приемником $I^2 r$. Произведение EI представляет собой мощность, вырабатываемую источником, т. е. электрическую мощность, преобразуемую им из другого вида мощности; например, если это генератор, — из механической мощности.

Если из вырабатываемой мощности вычесть потери мощности во внутреннем сопротивлении источника $I^2 r_0$, получим мощность UI , отдаваемую источником во внешнюю цепь. Мощность, отдаваемая источником в данной цепи, равна мощности, потребляемой приемником, $UI = I^2 r$. В связи с выражениями (5) и (6), а также схемой на рисунке 3 можно сделать вывод: вырабатываемая источником мощность определяется произведением тока на ЭДС, совпадающую по направлению с током, отдаваемая им мощность — произведением тока на напряжение, направленное внутри источника против тока; мощность, потребляемая приемником, определяется произведением тока на напряжение, совпадающее по направлению с током. Такие взаимные направления тока и ЭДС, а также тока и напряжения характерны для источников и приемников и в других электрических цепях. Учитывая это, выражения мощностей, вырабатываемых и отдаваемых источниками, а также потребляемых приемниками, могут быть записаны следующим образом:

$$P_{\text{выр}} = EI; P_{\text{отд}} = UI; P_{\text{потр}} = UI$$

Отношение мощности, отдаваемой источником, к вырабатываемой им мощности представляет собой КПД источника:

$$\eta = \frac{P_{\text{отд}}}{P_{\text{выр}}} = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E} = \frac{r}{r_0 + r}$$

Со знаком «+» в уравнение следует включать токи, положительные направления которых обращены к узлу, со знаком «-» — токи, положительные направления которых обращены от узла (можно и наоборот).

Согласно второму закону Кирхгофа в любом замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме напряжений на всех резистивных элементах контура, т. е.

$$\sum E = \sum I r. \quad (4)$$

Часто в электрических цепях встречаются элементы, между выводами которых имеются те или иные напряжения U (например, напряжение сети, напряжение, снимаемое с делителя напряжения, и т. д.).

Учитывая это, вместо (4) удобнее использовать следующую форму записи второго закона Кирхгофа:

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

При этом ЭДС, напряжения и токи, положительные направления которых совпадают с направлением обхода контура при составлении уравнения (5), следует включать в уравнение со знаком «+», а те, положительные направления которых не совпадают с направлением обхода контура, со знаком «-» (можно и наоборот).

При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа следует включать в них либо ЭДС и падение напряжения во внутренних сопротивлениях активных элементов, либо только их напряжения.

Часть электрической цепи, имеющая два вывода, с помощью которых она соединяется с другой частью цепи, называется **двухполюсником**. Различают **пассивные** и **активные** двухполюсники. Пассивные двухполюсники содержат только пассивные элементы, активные — как пассивные, так и активные элементы. Например, справа от точек a и b на рисунке 1в расположена схема пассивного двухполюсника, соединенного с активным двухполюсником, схема которого дана слева от указанных точек. Справа и слева от точек c и d на рисунке 1 расположены схемы двух активных двухполюсников, а между этими точками — пассивный двухполюсник.

Токосоведущие части различных элементов электрических цепей изготавливаются из проводниковых материалов, которые бывают твердыми, жидкими и газообразными. Основными проводниковыми материалами являются металлы и их сплавы.

Если проводник имеет одну и ту же площадь поперечного сечения по всей длине, то его сопротивление равно:

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

где l — длина проводника, м;
 S — площадь поперечного сечения проводника, м²;
 ρ — удельное сопротивление материала проводника, Ом/м.

Сопротивление металлических проводников при повышении температуры возрастает. Зависимость сопротивления от температуры выражается следующей формулой:

$$r_2 = r_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)],$$

где t_1 и t_2 — начальная и конечная температуры, °С;
 r_1 и r_2 — сопротивления при температурах t_1 и t_2 , Ом;
 α — температурный коэффициент сопротивления, °С⁻¹.

Сведения об удельных сопротивлениях и температурных коэффициентах проводниковых материалов приводятся в справочной литературе.

4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Последовательным называется такое соединение элементов, когда условный конец первого элемента соединяется с началом второго, конец второго — с началом третьего и т. д. Характерным для последовательного соединения является один и тот же ток во всех элементах.

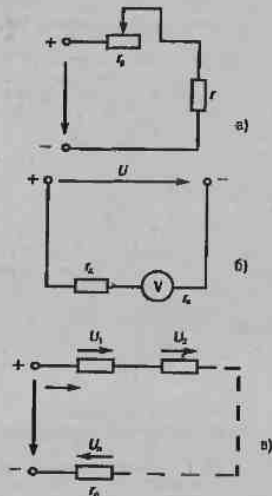


Рис. 4. Схема электрических цепей с последовательным соединением резистивных элементов

5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Параллельным называется такое соединение резистивных элементов, при котором соединяются между собой как условные начала всех элементов, так и их концы (рис. 5а). Характерным для параллельного соединения является одно и то же напряжение U на выводах всех элементов. Параллельно соединяются различные приемники электрической энергии и другие элементы электрических цепей, рассчитанные на одно и то же напряжение. При параллельном соединении не требуется согласовывать номинальные данные приемников, возможно включение и отключение любых приемников независимо от остальных, а при выходе из строя какого-либо приемника остальные остаются включенными.

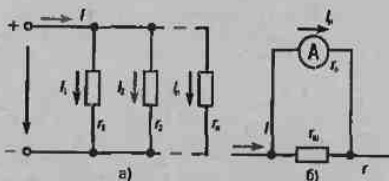


Рис. 5. Схемы электрических цепей с параллельным соединением резистивных элементов

Параллельное соединение применяется часто для расширения пределов измерения амперметров (рис. 5б): если ток I в электрической цепи превышает номинальный ток $I_{ном}$ амперметра, параллель-

6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ, СОДЕРЖАЩИЕ СОЕДИНЕНИЯ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Под соединением треугольником (рис. 6а) понимается такое, при котором вывод K_1 одного из элементов соединяется с выводом H_2 второго, вывод K_2 второго — с выводом H_3 третьего, а вывод K_3 третьего — с выводом H_1 первого элемента. Узловые точки a , b и c подключаются к остальной части электрической цепи.

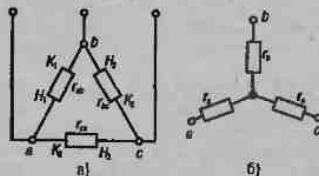


Рис. 6. Схема соединения резистивных элементов треугольником (а) и звездой (б)

Для упрощения анализа и расчета некоторых электрических цепей, содержащих соединения резистивных элементов треугольником, целесообразно заменить их эквивалентными резистивными элементами, соединенными звездой (рис. 6б). Примером подобных электрических цепей являются мостовые цепи (рис. 7а). Как видно, в мостовой цепи резистивные элементы образуют два смежных треугольника (r_{ab} , r_{bc} , r_{ca} и r_{bd} , r_{dc} , r_{cb}) и нет ни одного элемента, который был бы соединен с другими последовательно или параллельно. Это осложняет расчет и анализ электрической цепи. Если заменить, например, ре-

зистивные элементы r_{ab} , r_{bc} и r_{ca} , соединенные треугольником, эквивалентными элементами r_a , r_b и r_c , соединенными звездой (рис. 7б), получим цепь со смешанным соединением резистивных элементов.

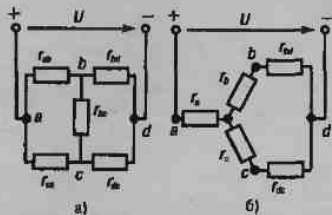


Рис. 7. Схема мостовой цепи (а) и соответствующая ей схема после замены одного из треугольников звездой (б)

Замена треугольника резистивных элементов эквивалентной звездой должна производиться таким образом, чтобы после указанной замены токи в остальной части цепи, а также напряжения между точками ab , bc и ca остались без изменения.

С помощью законов Кирхгофа можно получить следующие формулы для определения сопротивлений эквивалентной звезды:

$$r_a = \frac{r_{ab}r_{ca}}{r_{ab} + r_{bc} + r_{ca}} = \frac{r_{ab}r_{ca}}{\Sigma r_{\Delta}}; r_b = \frac{r_{ab}r_{bc}}{\Sigma r_{\Delta}}; r_c = \frac{r_{bc}r_{ca}}{\Sigma r_{\Delta}}. \quad (1)$$

Иногда оказывается целесообразным заменить резистивные элементы, соединенные звездой, эквивалентным треугольником. Соответствующие формулы можно получить путем совместного решения выражений (1).

но с ним включают шунтирующий резистор r_w . Нередко параллельное соединение используют для уменьшения эквивалентного сопротивления какого-либо участка электрической цепи.

Токи и мощности параллельно соединенных ветвей (рис. 5а) при $U = \text{const}$ не зависят друг от друга и определяются по формулам:

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

Ток и мощность всей цепи:

$$I = \sum_1^n I_k = U \sum_1^n \frac{1}{r_k} = U \sum_1^n g_k = U g_a = \frac{U}{r_a},$$

$$P_k = \sum_1^n P_k = UI = U \sum_1^n I_k = U^2 \sum_1^n g_k = \frac{U^2}{r_a} = I^2 r_a,$$

где $g_a = \sum_1^n g_k$ — эквивалентная проводимость;

$r_a = 1/g_a$ — эквивалентное сопротивление.

Соотношения между токами, мощностями, проводимостями и сопротивлениями:

$$\frac{I_k}{I} = \frac{P_k}{P} = \frac{g_k}{g_a} = \frac{r_a}{r_k}.$$

При увеличении числа параллельно соединенных ветвей эквивалентная проводимость электрической цепи возрастает, а эквивалентное сопротивление, соответственно, уменьшается. Это приводит к увеличению тока I . Если напряжение остается постоянным, то увеличивается также общая мощность P , токи и мощности ранее включенных ветвей не изменяются.

Пример: последовательно с приемником r часто включается резистор r_c для регулирования напряжения, тока и мощности приемника (рис. 4а). Для расширения пределов измерения вольтметров последовательно с ними включают добавочные резисторы r_k (рис. 4б). С помощью реостата, включаемого последовательно в различные ветви цепи двигателя постоянного тока, производят изменение его пускового тока или частоты вращения.

В общем случае при последовательном соединении n резистивных элементов (рис. 4в) ток в цепи, напряжения на элементах и потребляемые ими мощности определяются следующими соотношениями:

$$I = U / \sum_1^n r_k = \frac{U}{r_a}; U_k = Ir_k; P_k = IU_k = I^2 r_k,$$

где $k = 1, 2, \dots, n$ — номер элемента;

$$r_a = \sum_1^n r_k \quad \infty$$

Напряжение и мощность всей цепи:

$$U = \sum_1^n U_k = I \sum_1^n r_k; P = \sum_1^n P_k = IU = I \sum_1^n U_k = I^2 \sum_1^n r_k.$$

Соотношение между напряжениями, мощностями и сопротивлениями элементов:

$$\frac{U_k}{U} = \frac{P_k}{P} = \frac{r_k}{r_a},$$

где $l = 1, 2, \dots, n$ — номер элемента.

Приемники электрической энергии последовательно, как правило, не соединяются, так как при этом требуется согласование номинальных данных приемников, исключается возможность независимого их включения и отключения, а при выходе из строя одного из приемников отключаются также остальные приемники. Чаще их включают параллельно.

7. ПОНЯТИЕ ОБ ИСТОЧНИКЕ ТОКА

При расчете и анализе электрических цепей используют источники электрической энергии с параметрами E и r_0 , т. е. источники ЭДС, либо источники с указанными напряжениями. Иногда оказывается целесообразным заменить источник ЭДС эквивалентным ему источником тока, параметрами которого являются неизменные по значению ток короткого замыкания I_k и сопротивление r_0 . Рассмотрим источник тока на примере электрической цепи (см. рис. 8), в которой источник ЭДС заменим эквивалентным источником тока.

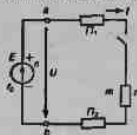


Рис. 8. Электрическая цепь

Источник тока следует считать эквивалентным в том случае, если после замены им источника ЭДС значения тока I , напряжения U и отдаваемой источником мощности UI при различных значениях сопротивления внешней цепи остаются без изменения. Это условие будет выполнено, если источник тока будет иметь такую же внешнюю характеристику, какую имеет источник ЭДС.

Вспользуемся указанным соображением для обоснования структуры электрической цепи источника тока. Разделив левую и правую части уравнения внешней характеристики источника ЭДС на сопротивление r_0 , получим

$$\frac{U}{r} = \frac{E}{r_0} - I, \quad (1)$$

где $\frac{E}{r_0} = I_k$ — ток короткого замыкания источника ЭДС, являющийся вместе с тем одним из параметров источника тока;

8. МЕТОД ЗАКОНОВ КИРХГОФА. МЕТОД КОНТУРНЫХ ТОКОВ

Покажем на схеме положительные направления известных и неизвестных величин. Сначала следует составить более простые уравнения по первому закону Кирхгофа, максимальное число которых должно быть на единицу меньше числа узловых точек. Недостающие уравнения следует составить по второму закону Кирхгофа.

В качестве примера составим схему уравнений для определения токов в электрической цепи, схема которой изображена на рисунке 10. Будем считать, что ЭДС и напряжения с их направлениями, а также сопротивления известны. Поскольку данная цепь имеет пять ветвей с неизвестными токами, необходимо составить пять уравнений. Выбрав положительные направления токов I_1, I_2, I_3, I_4 и I_5 для узлов a и b , а также для контуров $abda$ и $abcb$ при обходе последних по часовой стрелке, получим:

$$I_1 - I_2 + I_4 = 0; \quad -I_2 - I_4 + I_5 = 0; \\ -E_1 = -I_1(r_1 + r_{01}) - I_2 r_5 - U_{ab};$$

$$E_1 - E_2 = I_1(r_1 + r_{01}) + I_2(r_2 + r_{02}) - I_4 r_4;$$

$$E_2 = -I_2(r_2 + r_{02}) - I_5 r_6 + U_{cb}.$$

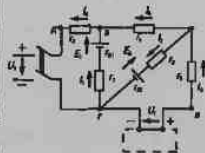


Рис. 10. К расчету разветвленных электрических цепей с помощью законов Кирхгофа

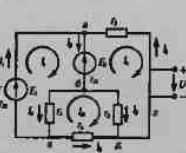


Рис. 11. К пояснению метода контурных токов

9. МЕТОД УЗЛОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Метод узлового напряжения дает возможность просто произвести анализ и расчет электрической цепи, содержащей несколько параллельно соединенных активных и пассивных ветвей, например цепи, схема которой изображена на рисунке 12.

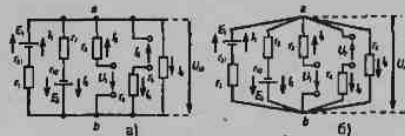


Рис. 12. Схема электрической цепи

Пренебрегая сопротивлением проводов, соединяющих ветви цепи, схему (рис. 12а) можно заменить более удобной для рассмотрения (рис. 12б).

В зависимости от значений и направлений ЭДС и напряжений, а также значений сопротивлений ветвей между узловыми точками a и b установится определенное узловое напряжение U_{ab} . Предположим, что оно направлено так, как показано на рисунке 12, и известно. Зная напряжение U_{ab} , легко найти все токи.

Выберем положительные направления токов, например так, как показано на рисунке. Тогда по второму закону Кирхгофа для контура, проходящего по первой ветви,

$$E_1 = I_1(r_1 + r_{01}) + U_{ab},$$

откуда:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{r_1 + r_{01}} = (E_1 - U_{ab})g_1.$$

Поступая аналогичным способом, нетрудно получить формулы для токов I_2 , I_3 и I_4 :

$$I_2 = (E_2 + U_{ab})g_2; \quad I_3 = (U_1 - U_{ab})g_3; \quad I_4 = (U_2 + U_{ab})g_4.$$

По закону Ома для левой ветви:

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{r_5} = U_{ab}g_5.$$

Для вывода формулы, позволяющей определить напряжение U_{ab} . Преобразуем формулу по первому закону Кирхгофа:

$$U_{ab} = \frac{E_1g_1 - E_2g_2 + U_{ab}g_3 - U_2g_4}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5}.$$

Формула узлового напряжения в общем случае имеет вид:

$$U_{ab} = \frac{\sum E g + \sum U g}{\sum g}.$$

Перед определением напряжения по последней формуле следует задаться его положительным направлением. Со знаком «+» должны входить ЭДС, направленные между точками a и b встречно направлению U_{ab} , и напряжения ветвей, направленные согласно с U_{ab} . Знаки в последней формуле не зависят от направления токов и ветвей.

При анализе и расчете электрических цепей методом узлового напряжения целесообразно выбирать положительные направления токов после определения узлового напряжения. В этом случае положительные направления токов нетрудно выбрать таким образом, чтобы все они совпадали с их действительными направлениями.

Метод контурных токов дает возможность упростить расчет электрических цепей по сравнению с методом законов Кирхгофа за счет уменьшения числа уравнений, которые приходится решать совместно.

Любая разветвленная электрическая цепь состоит из нескольких смежных контуров. Например, в электрической цепи (рис. 10) таких контуров три: $abga$, $bdaб$ и $aedba$. Каждый контур имеет несмежные ветви, принадлежащие лишь данному контуру, и смежные ветви, принадлежащие также соседним контурам. Так, контур $abga$ имеет несмежную ветвь ga и две смежные ветви ab и ba .

Допустим, что в каждом контуре (рис. 11) имеется некоторый контурный ток, одинаковый для всех элементов контура. На рисунке 11 контурные токи обозначены I_k и I_m . Положительные направления контурных токов могут быть выбраны произвольно. Наложим на контурные токи следующее условие: контурные токи должны быть равны по абсолютному значению токам несмежных ветвей соответствующих контуров.

Если выбрать положительное направление тока несмежной ветви совпадающим с контурным током, то ток ветви должен быть равен контурному току; если же направить ток несмежной ветви против контурного тока, то он должен быть равен контурному току со знаком «-». Так, токи в несмежных ветвях цепи будут равны:

$$I_1 = I_k; \quad I_2 = -I_m; \quad I_3 = -I_m; \\ I_4 = I_k + I_3 = I_k - I_m; \quad I_5 = I_k + I_m; \quad I_6 = I_m + I_m.$$

Видно, что со знаком «+» должен быть взят тот контурный ток, направление которого совпадает с направлением тока смежной ветви; контурный ток, направленный в противоположную сторону, должен быть взят со знаком «-».

Уравнение по второму закону Кирхгофа при включении в него контурных токов в общем случае имеет вид: $\sum E = \sum I_k r + \sum U_k$.

Для рассматриваемой цепи (рис. 11) уравнения будут:

$$E_2 = -I_k r_{02} + I_m (r_{02} + r_3 + r_5) - I_m r_5 + U_2;$$

$$E_1 - E_2 = I_k (r_{01} + r_{02} + r_4) - I_m r_{02} - I_m r_4;$$

$$0 = I_k (r_4 + r_5 + r_6) - I_m r_4 - I_m r_6.$$

$\frac{U}{r_0} = I_0$ — некоторый ток, определяемый как частное от деления U на r_0 .

Решив (1) относительно $\frac{E}{r_0}$, получим $\frac{E}{r_0} = \frac{U}{r_0} + I$, или

$$I_k = I_0 + I. \quad (2)$$

Так как токи I_0 и I определяются путем деления одного и того же Напряжения U на соответствующие сопротивления, то в электрической цепи с источником тока должны быть две ветви с соединенными параллельно резистивными элементами r_0 и r . Согласно (2) параллельно указанным ветвям должна быть включена третья ветвь, содержащая элемент с током I_k .

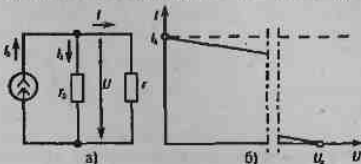


Рис. 9. Схема электрической цепи

Схема электрической цепи, эквивалентная приведенной на рисунке 8, но содержащая источник тока, дана на рисунке 9а. Элемент с током I в совокупности с резистором r_0 и представляет собой источник тока:

$$I = I_k - I_0 = I_k - \frac{U}{r_0}. \quad (3)$$

Получили уравнение внешней характеристики $I(U)$ источника тока. Уравнение (3) и внешняя характеристика, построенная с помощью этого уравнения (рис. 9б), дадут при любом режиме работы цепи такие же значения тока I и напряжения U , как и в случае источника ЭДС.

10. МЕТОД НАЛОЖЕНИЯ

Метод наложения основан на том, что в линейных электрических цепях ток любой ветви может быть определен как алгебраическая сумма токов от каждого источника в отдельности.

Расчет электрических цепей методом наложения производят в таком порядке. Из электрической цепи удаляют все источники ЭДС и напряжения, кроме одного. Сохранив в электрической цепи все резистивные элементы, в том числе и внутренние сопротивления источников, производят расчет электрической цепи. Внутренние сопротивления источников с указанными напряжениями полагают равными нулю. Подобным образом поступают столько раз, сколько имеется в цепи источников.

Результирующий ток каждой ветви определяют как алгебраическую сумму токов от всех источников. Для того чтобы результирующие токи совпадали с действительными направлениями, целесообразно выбирать положительные направления результирующих токов после определения токов от всех источников.

Метод наложения весьма удобен для анализа явлений, происходящих в электрических цепях при изменении их параметров.

Например, используя метод наложения, нетрудно определить характер изменения токов ветвей в цепи (см. рис. 13) при увеличении ЭДС E_1 до E_1' .

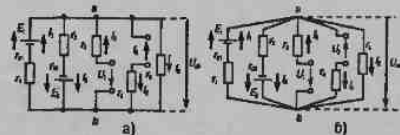


Рис. 13. Схема электрической цепи

11. МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА

Метод эквивалентного генератора дает возможность упростить анализ и расчет электрических цепей в том случае, когда требуется определить ток, напряжение или мощность лишь одной ветви.

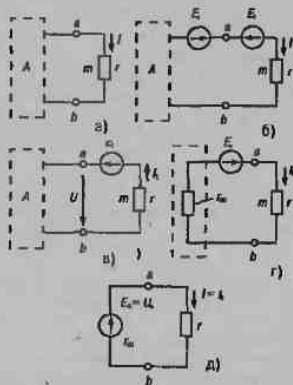


Рис. 14. Схема электрической цепи эквивалентного генератора

Предположим, что требуется найти ток I ветви amb некоторой электрической цепи (рис. 14а), остальные элементы которой сосредоточены в пределах прямоугольника, представляющего собой активный двухзащупник A .

Согласно методу наложения ток I не изменится, если в данную ветвь ввести два источника, ЭДС которых E_1 и E_2 равны и направлены в разные стороны (рис. 14б).

12. ПОЛУЧЕНИЕ СИНУСОИДАЛЬНОЙ ЭДС. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Электрические цепи, в которых значения и направления ЭДС, напряжения и тока периодически изменяются во времени по синусоидальному закону, называются цепями синусоидального тока. Иногда их называют просто цепями переменного тока.

Электрические цепи, в которых значения и направления ЭДС, напряжения и тока периодически изменяются во времени по законам, отличным от синусоидального, называются цепями несинусоидального тока.

Генераторы электрических станций переменного тока устроены так, что возникающая в их обмотках ЭДС изменяется по синусоидальному закону. Синусоидальная ЭДС в линейных цепях, где содержатся резистивные, индуктивные и емкостные элементы, возбуждает ток, изменяющийся по закону синуса.

Возникающие при этом ЭДС самоиндукции в катушках и напряжения на конденсаторах, как это вытека-

ет из выражений: $e = -L \frac{di}{dt}$; $i = C \frac{du}{dt}$, также изменя-

ются по синусоидальному закону, так как производная синусоидальной функции есть функция синусоидальная. Напряжение на резистивном элементе будет также изменяться по синусоидальному закону: $u = ir$.

Целесообразность технического использования синусоидального тока обусловлена тем, что КПД генераторов, двигателей, трансформаторов и линий электропередачи при синусоидальной форме ЭДС, напряжения и тока получается наивысшим по сравнению с несинусоидальным током. Кроме того, при иных формах изменения тока из-за ЭДС самоиндукции могут возникать значительные перенапряжения на отдельных участках цепи. Важную роль играет и тот факт, что расчет цепей, где ЭДС, напряжение и ток изменяются синусоидально, значительно проще, чем расчет цепей, где указанные величины изменяются по несинусоидальному закону.

Рассмотрим механизм возникновения и основные соотношения, характерные для синусоидальной ЭДС. Для этого удобно использовать простейшую модель —

рамку, вращающуюся с постоянной угловой скоростью в равномерном магнитном поле. Проводники рамки, перемещаясь в магнитном поле, пересекают его, и в них на основании закона электромагнитной индукции наводится ЭДС. Значение ЭДС пропорционально магнитной индукции B , длине проводника l и скорости перемещения проводника относительно поля v : $e = Bhv$.

Выразив скорость v через окружающую скорость ω и угол α , получим: $e = Bhv \sin \alpha = E_m \sin \alpha$.

Угол α равен произведению угловой скорости рамки ω на время t : $\alpha = \omega t$.

Таким образом, ЭДС, возникающая в рамке, будет равна: $e = E_m \sin \alpha = E_m \sin \omega t$.

За один поворот рамки происходит полный цикл изменения ЭДС.

Если при $t = 0$ ЭДС e не равна нулю, то выражение ЭДС записывается в виде:

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi),$$

где e — мгновенное значение ЭДС (значение ЭДС в момент времени t);

E_m — амплитудное значение ЭДС (значение ЭДС

в момент времени $\omega t + \psi = \frac{\pi}{2}$);

$(\omega t + \psi)$ — фаза;

ψ — начальная фаза.

Фаза определяет значение ЭДС в момент времени t , начальная фаза — при $t = 0$.

Время одного цикла называется периодом T ,

а число периодов в секунду — частотой f : $f = \frac{1}{T}$.

Единицей измерения частоты является с⁻¹, или

грц (Гц). Величина $\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ в электротехнике называется угловой частотой и измеряется в рад/с.

Частота вращения рамки n и частота ЭДС f связаны между собой соотношением: $\omega = 2\pi f = \frac{\pi n}{30}$, от-

куда $f = \frac{n}{60}$.

Ток I можно определить как разность двух токов:

$$I = I_1 + I_2,$$

где I_1 — ток, вызванный всеми источниками двухполюсника A и ЭДС E_1 (рис. 14в);

I_2 — ток, вызванный только ЭДС E_2 (рис. 14г).

Если выбрать ЭДС E_1 таким образом, чтобы получить $I_1 = 0$, то ток I будет равен:

$$I = I_2 = \frac{E_2}{r_{02} + r}$$

где r_{02} — эквивалентное сопротивление двухполюсника A относительно выводов a и b .

Так как при $I_1 = 0$ (рис. 14в) активный двухполюсник A будет работать относительно ветви amb в режиме холостого хода, то между выводами a и b установится напряжение холостого хода $U = U_1$ и по второму закону Кирхгофа получим $E_1 = I_1 r + U_1$. Но по условию $E_2 = E_1$, поэтому и $E_2 = U_1$. Учитывая это, формулу для определения тока I можно записать в такой форме:

$$I = \frac{E_2}{r_{02} + r} = \frac{U_1}{r_{02} + r}.$$

В соответствии с последней формулой электрическая цепь (рис. 14а) может быть заменена эквивалентной цепью (рис. 14д), в которой $E_2 = U_1$ и r_{02} следует рассматривать как ЭДС и внутреннее сопротивление некоторого эквивалентного генератора. В результате возможности такой замены и возникло название изложенного метода.

Значения $E_2 = U_1$ и r_{02} можно определить как расчетным, так и экспериментальным путем. Для расчетного определения U_1 и r_{02} необходимо знать параметры элементов активного двухполюсника A и схему их соединения. При определении сопротивления r_{02} необходимо удалить из схемы двухполюсника все источники, сохранив все резистивные элементы, в том числе и внутренние сопротивления источников ЭДС. Внутреннее сопротивление источников с указанными напряжениями следует принять равными нулю.

Действительно, предположим, что при некоторых параметрах цепи до увеличения E_1 установились токи, действительные направления которых совпадают с указанными на рисунке 13. Для решения задачи заменим мысленно увеличение ЭДС E_1 введением в первую ветвь дополнительного источника с $r_{доп} = 0$ и $E_{доп} = E_1' - E_1$. После этого удалим из цепи все источники, кроме источника с ЭДС $E_{доп}$, и определим действительные направления дополнительных токов от этого источника, которые очевидны.

Поскольку дополнительный ток первой ветви $I_{доп}$ будет совпадать по направлению с током I_1 , для определения результирующего тока первой ветви следует воспользоваться формулой $I_1' = I_1 + I_{доп}$. На основании данной формулы можно сделать вывод о том, что при увеличении E_1 ток I_1 будет возрастать. К такому же выводу можно прийти и в отношении токов других ветвей, кроме третьей.

Так как дополнительный ток третьей ветви $I_{доп}$ направлен против тока I_2 , то для определения результирующего тока нужно использовать формулу $I_2' = I_2 + I_{доп}$. В отношении результирующего тока третьей ветви можно сделать такой вывод: при увеличении ЭДС E_1 ток I_2 будет сначала уменьшаться, при некотором значении E_1 окажется равным нулю, а при дальнейшем увеличении E_1 изменит направление ($I_2 < 0$) и по абсолютному значению будет возрастать.

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

Реальная катушка любого электротехнического устройства обладает определенным активным сопротивлением r и индуктивностью L . Участок цепи с индуктивностью L будем рассматривать как участок, обладающий индуктивным сопротивлением x_L . Уравнение напряжений, составленное по второму закону Кирхгофа для цепи с r и L , имеет вид: $U = U_r + U_L$.

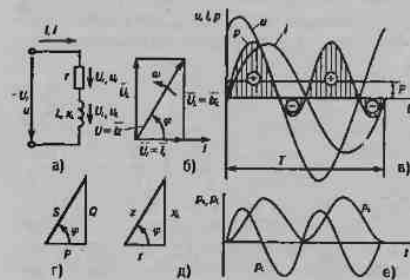


Рис. 13. Цепь, содержащая катушку с активным сопротивлением R и индуктивностью

На векторной диаграмме (рис. 13б) вектор \bar{U}_r совпадает с вектором тока, а вектор \bar{U}_L опережает вектор тока на 90° .

Из диаграммы следует, что вектор напряжения сети равен геометрической сумме векторов \bar{U}_r и \bar{U}_L .

$\bar{U} = \bar{U}_r + \bar{U}_L$, а его значение $U = \sqrt{U_r^2 + U_L^2}$.

14. ЦЕПЬ, СОДЕРЖАЩАЯ РЕЗИСТИВНЫЙ И ЕМКОСТНОЙ ЭЛЕМЕНТЫ

Участок цепи с емкостью C будем представлять как участок, обладающий емкостным сопротивлением x_C . В этом случае уравнение напряжений цепи (рис. 14а) имеет вид: $\bar{U} = \bar{U}_r + \bar{U}_C$.

На (рис. 14б) изображена векторная диаграмма цепи r и C .

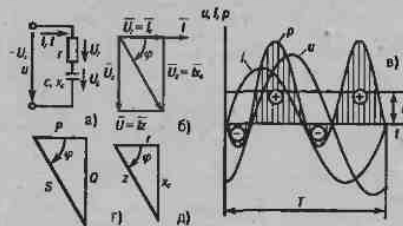


Рис. 14. Электрическая цепь, содержащая резистивный r и емкостной C элементы (а), ее векторная диаграмма (б), графики мгновенных значений (в), треугольники мощностей и сопротивлений (г и д)

Вектор напряжения \bar{U}_r совпадает с вектором тока, вектор \bar{U}_C отстает от вектора тока на угол 90° . Из диаграммы следует, что модуль напряжения, приложенного к цепи, равен: $U = \sqrt{U_r^2 + U_C^2}$.

Выразив U_r и U_C через ток и сопротивления, полу-

чим: $U = \sqrt{(Ir)^2 + (Ix_C)^2}$, откуда $U = I\sqrt{r^2 + x_C^2}$.

15. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ R, L, C

Уравнение напряжений для цепи (рис. 17а) имеет вид: $\bar{U} = \bar{U}_r + \bar{U}_L + \bar{U}_C$.

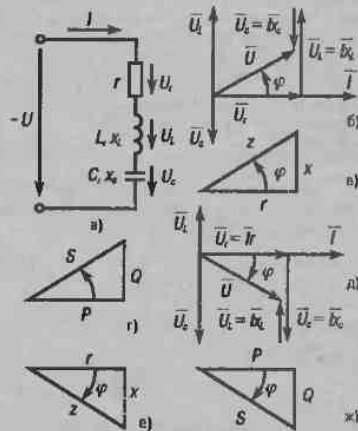


Рис. 15. Электрическая цепь, содержащая последовательно включенные r , L и C (а), ее векторная диаграмма (б), треугольники сопротивлений и мощностей (в и г) цепи при $x_L > x_C$, векторная диаграмма (д), треугольники сопротивлений и мощностей (е и ж) цепи при $x_C > x_L$.

Векторные диаграммы для цепи (рис. 17а) изображены на рисунках 17б и 17в. Вектор напряжения на активном сопротивлении \bar{U}_r совпадает с векто-

ром тока, вектор напряжения на индуктивности \vec{U}_L опережает вектор тока на 90° , вектор напряжения на емкости \vec{U}_C отстает от вектора тока на 90° . Следовательно, между векторами напряжения на индуктивности и емкости образуется угол в 180° .

Если $x_L > x_C$, то и $U > U_C$ и векторная диаграмма будет такой (см. рис. 17б), а треугольник сопротивлений — на рисунке 17в, где $x = x_L - x_C$. Если $x_C > x_L$, то $U_C > U_L$ и векторная диаграмма будет иметь вид, изображенный на рисунке 17е, где $x = x_C - x_L$.

Значение напряжения, приложенного к цепи:

$$U = \sqrt{(U_r)^2 + (U_L - U_C)^2}.$$

Выразив напряжение через ток и сопротивления, получим $U = \sqrt{(Ir)^2 + (Ix_L - Ix_C)^2} = I\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}$.

Последнее выражение представляет собой закон Ома для последовательной цепи r, L, C :

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}} = \frac{U}{z},$$

где z — полное сопротивление цепи;

x — реактивное сопротивление цепи.

На основании проведенного анализа цепи, состоящей из последовательно соединенных r, L, C , можно сделать следующие выводы.

Если $x_L > x_C$, то напряжение сети опережает по фазе ток на угол $\varphi: v = U_m \sin(\omega t + \varphi)$.

Цепь имеет активно-индуктивный характер.

Если $x_C > x_L$, то напряжение сети отстает по фазе от тока на угол $\varphi: v = U_m \sin(\omega t + \varphi)$.

Цепь имеет активно-емкостный характер.

Последнее выражение представляет собой закон

$$\text{Ома цепи } r \text{ и } C: I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_C^2}} = \frac{U}{z}, \text{ где } z \text{ — полное}$$

сопротивление.

Графики $u(t), i(t)$ изображены на рисунке 16а. Разделив стороны треугольника напряжений (рис. 16б) на ток, получим треугольник сопротивлений (рис. 16в), из которого можно определить косинус угла сдвига фаз между током и напряжением:

$$\cos \varphi = \frac{r}{z} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + x_C^2}}.$$

Мгновенная мощность цепи: $p = ui = I_m \sin \omega t U_m \times \sin(\omega t - \varphi)$.

Средняя мощность за период: $P_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T uidt =$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T I_m U_m \sin \omega t \times \sin(\omega t - \varphi) dt = UI \cos \varphi$$

Подставив вместо $\cos \varphi$ его значение, получим

$$P_{\text{ср}} = UI \cos \varphi = UI \frac{r}{z} = I^2 r = P.$$

Таким образом, среднее значение мощности цепи с r, C , так же как и цепи с r, L , представляет собой активную мощность, которая выделяется в активном сопротивлении r в виде теплоты.

На (рис. 16а) изображен график мгновенной мощности цепи с r, C .

Энергетические процессы цепи с r, C можно рассматривать как совокупность процессов, происходящих отдельно в цепи с r и C . Из сети непрерывно поступает активная мощность. Реактивная мощность, обусловленная электрическим полем емкости, непрерывно циркулирует между источником и цепью. Ее среднее значение за период равно нулю.

Выразив напряжения через ток и сопротивления,

$$\text{получим } U = \sqrt{(Ir)^2 + (Ix_L)^2} = I\sqrt{r^2 + x_L^2}.$$

Последнее выражение представляет собой закон

$$\text{Ома цепи (рис. 15г): } I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_L^2}} = \frac{U}{z}, \text{ где } z \text{ — полное}$$

сопротивление цепи.

Из векторной диаграммы следует, что напряжение цепи опережает по фазе ток на угол ρ и его мгновенное значение равно: $v = U_m \sin(\omega t + \varphi)$.

Графики мгновенных значений напряжения и тока цепи изображены на рисунке 15в.

Угол сдвига по фазе φ между напряжением и названным им током определяют из соотношения:

$$\cos \varphi = \frac{U_r}{U} = \frac{Ir}{Iz} = \frac{r}{z} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + x_L^2}}.$$

График $p_n(t)$ показывает, что активная мощность непрерывно поступает из сети и выделяется в активном сопротивлении в виде теплоты. Она равна:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T U_m I_m \sin^2 \omega t dt = UI = UI \cos \varphi.$$

Мгновенная мощность, обусловленная энергией магнитного поля индуктивности, циркулирует между сетью и катушкой. Ее среднее значение за период равно нулю:

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^T U_m I_m \sin \omega t \times \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) dt = 0.$$

16. АКТИВНАЯ, РЕАКТИВНАЯ И ПОЛНАЯ МОЩНОСТИ ЦЕПИ

Активная мощность цепи — $P = UI = I^2 r$, Вт.

Реактивная индуктивная мощность цепи, обусловленная энергией магнитного поля, — $Q_L = UI = I^2 x_L$, ВАР.

Реактивная емкостная мощность цепи, обусловленная энергией электрического поля, — $Q_C = UI = I^2 x_C$, ВАР.

Реактивная мощность цепи $Q = Q_L - Q_C = I^2 x$, ВАР, — это та мощность, которой приемник обменивается с сетью.

Полная мощность цепи — $S = UI = I Z$, ВА, $\cos \varphi$ = коэффициент мощности цепи. Тогда $P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi$; $Q = S \sin \varphi = UI \sin \varphi$;

$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI$.

За единицу активной мощности принят ватт (Вт), реактивной мощности — вольт-ампер реактивный (ВАР), полной мощности — вольт-ампер (ВА).

Реактивные (индуктивная, емкостная) мощности, обусловленные соответственно энергией магнитного поля индуктивности и электрического поля емкости, не совершают никакой полезной работы, но они оказывают существенное влияние на режим работы электрической цепи. Циркулируя по проводам трансформаторов, генераторов, двигателей, линий передач, они нагревают их. Поэтому расчет проводов и других элементов устройств переменного тока производят исходя из полной мощности, которая учитывает активную и реактивную мощности.

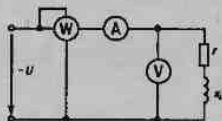


Рис. 18. Схема включения приборов для измерения активной, реактивной и полной мощностей цепи, а также ее параметров

17. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

Известно, что в механической системе резонанс наступает при равенстве собственной частоты колебаний системы и частоты колебаний возмущающей силы, действующей на систему. Колебания механической системы, например колебания маятника, сопровождаются периодическим переходом кинетической энергии в потенциальную и наоборот. При резонансе механической системы малые возмущающие силы могут вызывать большие колебания системы, например большую амплитуду колебаний маятника.

В цепях переменного тока, где есть индуктивность и емкость, могут возникнуть явления резонанса, которые аналогичны явлению резонанса в механической системе. Полная аналогия — равенство собственной частоты колебаний электрического контура частоте возмущающей силы (частоте напряжения сети) — возможна не во всех случаях.

В общем случае под резонансом электрической цепи понимают такое состояние цепи, когда ток и напряжение совпадают по фазе, и следовательно, эквивалентная схема цепи имеет место при определенном соотношении ее параметров r, L, C , когда резонансная частота цепи равна частоте приложенного к ней напряжения.

Резонанс в электрической цепи сопровождается периодическим переходом энергии электрического поля емкости в энергию магнитного поля и наоборот.

При резонансе в электрической цепи малые напряжения, приложенные к цепи, могут вызвать значительные токи и напряжения на отдельных участках. В цепи, где r, L, C соединены последовательно, может возникнуть резонанс напряжений, а в цепи, где r, L, C соединены параллельно, — резонанс токов.

Рассмотрим явление резонанса напряжений на примере цепи (рис. 19).

Как отмечалось, при резонансе ток и напряжение совпадают по фазе, т. е. угол $\varphi = 0$, и полное сопротивление цепи равно ее активному сопротивле-

нию: $z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = r$.

18. РЕЗОНАНС ТОКОВ

Резонанс токов может возникнуть в параллельной цепи (см. рис. 20а), одна из ветвей которой содержит L и r , а другая — C и r .

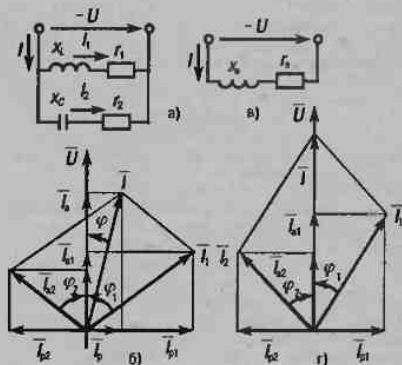


Рис. 20. Резонанс токов в параллельной цепи

Резонансом токов называется такое состояние цепи, когда общий ток совпадает по фазе с напряжением, реактивная мощность равна нулю и цепь потребляет только активную мощность. На рисунке 20г изображена векторная диаграмма цепи (рис. 20а) при резонансе токов.

Как видно из векторной диаграммы, общий ток цепи совпадает по фазе с напряжением, если реактивные составляющие токов ветвей с индуктивностью и емкостью равны по модулю: $I_{10} = I_{20}$.

Общий реактивный ток цепи, равный разности реактивных токов ветвей, в этом случае равен нулю: $I_{12} - I_{22} = 0$.

Общий ток цепи имеет только активную составляющую, равную сумме активных составляющих токов ветвей: $I_1 = I_{1a} = I_{2a}$.

В идеальном случае, когда $r_1 = r_2 = 0$, $f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

При резонансе токов коэффициент мощности равен единице: $\cos \varphi = 1$.

Полная мощность равна активной мощности: $S = P$.

Реактивная мощность равна нулю: $Q = Q_1 - Q_2 = 0$.

Энергетические процессы в цепи при резонансе токов аналогичны процессам, происходящим при резонансе напряжений.

Реактивная энергия действует внутри цепи: в одну часть периода энергия магнитного поля индуктивности переходит в энергию электрического поля емкости, в следующую часть периода энергия электрического поля емкости переходит в энергию магнитного поля индуктивности. Обмена реактивной энергией между потребителями цепи и источником питания не происходит. Ток в проводах, соединяющих цепь с источником, обусловлен только активной мощностью.

Для резонанса токов характерно, что общий ток при определенном сочетании параметров цепи может быть значительно меньше токов в каждой ветви. Например, в идеальной цепи, когда $r_1 = r_2 = 0$, общий ток равен нулю, а токи ветвей с емкостью и индуктивностью существуют: они равны по модулю и сдвинуты по фазе на 180° . Резонанс в цепи при параллельном соединении потребителей называется резонансом токов.

Резонанс токов может быть получен путем подбора параметров цепи при заданной частоте источника питания или путем подбора частоты источника питания при заданных параметрах цепи.

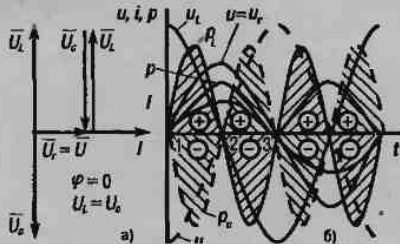


Рис. 19. Явление резонанса напряжений

Это равенство будет иметь место, если $x_L = x_C$, т. е. реактивное сопротивление цепи равно нулю: $x = x_L - x_C$.

Выразив x_L и x_C соответственно через L , C и f , получим:

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}, \text{ откуда } f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_{\text{рез}}$$

где f — частота напряжения, подведенного к контуру; $f_{\text{рез}}$ — резонансная частота.

Таким образом, при $x_L = x_C$ в цепи возникает резонанс напряжений, так как резонансная частота равна частоте напряжения, подведенного к цепи.

Из выражения закона Ома для последовательной цепи:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}}$$

При резонансе:

$$Ix_L = Ix_C = U_C = U_L; U_r = I_r = U;$$

$$Q = Q_C - Q_L = U_C I - U_L I = 0.$$

Коэффициент мощности имеет большое практическое значение: он показывает, какая часть полной мощности является активной мощностью. Полная мощность и коэффициент мощности наряду с другими параметрами являются расчетными величинами и в конечном счете определяют габаритные размеры трансформаторов, генераторов, двигателей и других электротехнических устройств.

Измерение активной, реактивной, полной мощности и $\cos \varphi$, а также параметров цепи, например r и L , можно произвести с помощью ваттметра, амперметра и вольтметра, включенных в цепь по схеме, изображенной на рисунке 18.

Ваттметр измеряет активную мощность P цепи. Полная мощность цепи равна произведению показаний вольтметра и амперметра.

Реактивную (индуктивную) мощность и коэффициент мощности цепи (рис. 18) определяют расчетным путем по формулам:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}; \cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Активное сопротивление находят из формулы:

$$P = I^2 r, \text{ откуда } r = \frac{P}{I^2}$$

Полное сопротивление цепи — $z = \frac{U}{I}$.

Индуктивное сопротивление — $x_L = \sqrt{z^2 - r^2}$.

Индуктивность L определяют из формулы: $x_L = 2\pi fL$,

$$\text{откуда } L = \frac{x_L}{2\pi f}$$

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

Чтобы уменьшить число проводов, отдельные фазы источников соединяют между собой звездой или треугольником.

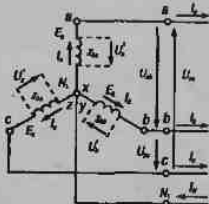


Рис. 21. Схема соединения фаз генератора звездой

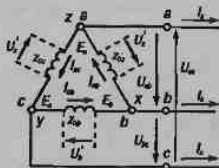


Рис. 22. Схема соединения фаз генератора треугольником

При соединении звездой (рис. 21) концы x , y и z трех фаз объединяют в одну общую, так называемую нейтральную точку N . При соединении треугольником (рис. 22) конец x одной фазы соединяют с началом b второй фазы, конец второй фазы — с началом c третьей фазы, а конец z третьей фазы — с началом a первой фазы. В обоих случаях начала a , b и c

20. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ФАЗНЫМИ И ЛИНЕЙНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ ИСТОЧНИКОВ. НОМИНАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Фазные напряжения источника отличаются от его ЭДС вследствие падений напряжения во внутренних сопротивлениях источника, а напряжения приемника отличаются от напряжений источника за счет падений напряжения в сопротивлениях проводов электрической сети. Пока же для упрощения анализа за соотношений в трехфазных цепях будем пренебрегать указанными падениями напряжения.

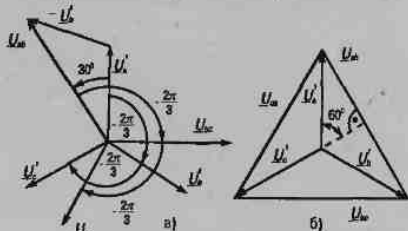


Рис. 23. Векторные диаграммы фазных и линейных напряжений при соединении источника звездой

Применяя второй закон Кирхгофа поочередно ко всем фазам, при сделанном допущении и соединении источников звездой получим:

$$U_a = E_a, U_b = E_b, U_c = E_c.$$

На основании этих выражений можно сделать вывод о том, что если генератор имеет симметричную систему ЭДС, то его фазные напряжения тоже симметричны, а векторная диаграмма фазных напряжений (рис. 23а) не отличается от векторной диаграммы ЭДС генератора.

21. СОЕДИНЕНИЯ ПРИЕМНИКОВ ЗВЕЗДОЙ

Из рисунка 25 видно, что при соединении звездой фазные напряжения приемника $U_{a'}$, $U_{b'}$ и $U_{c'}$ не равны линейным напряжениям U_{ab} , U_{bc} и U_{ca} . Применяя второй закон Кирхгофа и к контурам $aNba$, $bNcb$ и $cNac$, можно получить следующие соотношения между линейными и фазными напряжениями: $U_{ab} = U_a - U_{a'}$; $U_{bc} = U_b - U_{b'}$; $U_{ca} = U_c - U_{c'}$. Нетрудно построить векторы линейных напряжений (рис. 26).

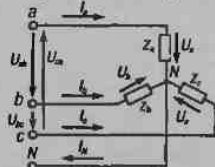


Рис. 25. Схема соединения приемника звездой

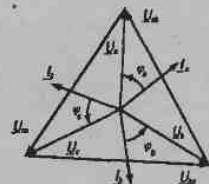


Рис. 26. Векторная диаграмма при соединении приемника звездой в случае симметричной нагрузки

Если не учитывать сопротивлений линейных проводов и нейтрального провода, то следует считать комплексные значения линейных и фазных напря-

жений приемника равными, соответственно, комплексным значениям линейных и фазных напряжений источника. Вследствие указанного равенства векторная диаграмма напряжений приемника не отличается от векторной диаграммы источника при соединении звездой (см. рис. 26). Линейные и фазные напряжения приемника, как и источника, образуют две симметричные системы напряжений. Между линейными и фазными напряжениями приемника существует соотношение $U_n = \sqrt{3}U_\phi$.

Это соотношение справедливо при определенных условиях также в случае отсутствия нейтрального провода, т. е. в **трехпроводной** цепи.

На основании указанного соотношения можно сделать вывод о том, что соединение звездой следует применять в том случае, когда каждая фаза трехфазного приемника или однофазные приемники рассчитаны на напряжение в $\sqrt{3}$ раз меньше, чем номинальное линейное напряжение сети.

Из схемы рисунка 25 видно, что при соединении звездой линейные токи равны соответствующим фазным токам: $I_a = I_\phi$.

С помощью **первого закона Кирхгофа** получим следующее соотношение между фазными токами и током нейтрального провода:

$$I_a + I_b + I_c = I_n$$

Имея векторы фазных токов, нетрудно построить вектор тока нейтрального провода.

Если нейтральный провод отсутствует, то

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

На основании уравнений по **второму закону Кирхгофа** для контуров N_1abN_1 , N_1bcN_1 и N_1caN_1 нетрудно получить следующие уравнения, связывающие линейные и фазные напряжения:

$$U_{ab} = U_a - U_b; U_{bc} = U_b - U_c; U_{ca} = U_c - U_a$$

Можно построить векторы линейных напряжений U_{ab} , U_{bc} и U_{ca} .

Из векторной диаграммы (рис. 23а) следует, что при соединении источника звездой линейные напряжения равны и сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол. Векторы линейных напряжений изображают чаще соединяющими векторы соответствующих фазных направлений, как показано на рисунке 23б. Из векторной диаграммы (рис. 23б) следует, что $U_{ab} = 2U_\phi \sin 60^\circ = \sqrt{3}U_\phi$.

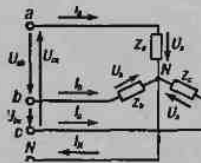


Рис. 24. Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений при соединении источника треугольником

Такое же соотношение существует между любыми другими линейными и фазными напряжениями. Поэтому можно написать, что вообще при соединении источника звездой $U_n = \sqrt{3}U_\phi$.

Линейные напряжения равны соответствующим фазным напряжениям: $U_{ab} = U_a$; $U_{bc} = U_b$; $U_{ca} = U_c$.

Можно написать, что при соединении источника треугольником вообще $U_n = U_\phi$.

Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений при соединении источника треугольником приведена на рисунке 24.

трех фаз с помощью трех линейных проводов подключаются к приемникам электрической энергии, которые также соединяются **звездой или треугольником**.

Способы соединения фаз источников и приемников могут быть как одинаковыми, так и различными. При соединении фаз источника и приемника звездой иногда применяется нейтральный провод, соединяющий нейтральные точки N_1 и N источника и приемника.

Может показаться, что при соединении фаз источника треугольником в замкнутом контуре возникает ток даже при отключенных приемниках. Но это не так, поскольку $E_a + E_b + E_c = 0$.

Электрические цепи при соединении источника треугольником и звездой без нейтрального провода называются **трехпроводными**, при соединении источника звездой с нейтральным проводом — **четырёхпроводными**.

В **трехфазных** электрических цепях различают **фазные** и **линейные** напряжения и токи.

Фазными называются напряжения между началами и концами отдельных фаз источника или приемника.

Под **фазными** понимают токи в фазах источника или приемника. Например, на рисунке 21 фазными напряжениями и токами являются U_a , U_b , U_c , I_a , I_b и I_c . На рисунке 22 фазные напряжения и токи обозначены U_ϕ , U_ϕ , U_ϕ , I_ϕ , I_ϕ , I_ϕ .

Линейными называются напряжения между началами фаз источника или приемника либо между линейными проводами. Линейными токами являются токи в трех линейных проводах, соединяющих источник и приемник.

За положительные направления ЭДС источника принимают направления от концов фаз к их началам. Фазные токи направляют согласно с ЭДС, а фазные напряжения — в противоположную сторону.

Линейные напряжения направляют следующим образом: напряжение U_{ab} — от а к b, U_{bc} — от b к c, U_{ca} — от c к а. Линейные токи во всех линейных проводах направляют к приемникам.

22. СОЕДИНЕНИЯ ПРИЕМНИКОВ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Как видно из схемы, каждая фаза приемника при соединении треугольником подключена к двум линейным проводам. Поэтому независимо от значения и характера сопротивлений приемника каждое фазное напряжение равно соответствующему линейному напряжению: $U_{\phi} = U_{\text{л}}$.

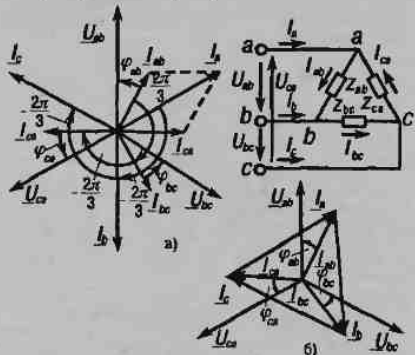


Рис. 27. Соединение фаз приемника треугольником и векторные диаграммы в случае симметричной нагрузки

Если не учитывать сопротивлений проводов сети, то напряжения приемника следует считать равными линейным напряжениям источника.

На основании схемы и последнего выражения можно сделать вывод о том, что соединение треугольником следует применять тогда, когда каждая фаза трехфазного приемника или однофазные приемники рассчитаны на напряжение, равное номинальному линейному напряже-

23. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВ

Магнитный усилитель (МУ) состоит из двух ферромагнитных магнитопроводов, на каждом из которых расположены рабочая обмотка ОР и обмотка управления ОУ. Для уменьшения потерь мощности магнитопроводы изготавливают из отдельных стальных листов. В некоторых случаях применяют ферритовые магнитопроводы. Рабочие обмотки соединяют, как показано на рисунке, параллельно либо последовательно и подключают к источнику переменного тока. В цепь рабочих обмоток включен приемник электрической энергии r . Обмотки управления соединены последовательно и получают питание от источника постоянного тока. Существенным является то, что обмотки управления включены встречно. Это дает возможность значительно уменьшить переменную составляющую тока в цепи управления, возникающую из-за магнитной связи между обмотками. Часто вместо двух обмоток управления МУ снабжается одной. Чтобы уменьшить переменную составляющую тока в цепи управления, обмотка должна охватывать в этом случае сразу два стержня магнитопроводов. Цель обмоток управления является входной целью МУ, цель рабочих обмоток — его выходной целью.

Магнитный усилитель, изображенный на рисунке 29а, называется усилителем с выходом на переменном токе. Если приемник рассчитан на питание постоянным током, то его включают в цепь рабочих обмоток через выпрямительный мост (рис. 29б). Магнитный усилитель в этом случае называется усилителем с выходом на постоянном токе.

Кроме магнитопроводов прямоугольной формы, МУ имеют магнитопроводы круглой и овальной формы. Вместо двух магнитопроводов некоторые МУ имеют один трехстержневой.

Обычно МУ снабжают несколькими обмотками управления, что дает возможность усиливать одновременно несколько сигналов, а также воздействовать на свойства и характеристику МУ. В зависимости от назначения обмоткам управления присваиваются соот-

24. ПОНЯТИЕ О ДВУХТАКТНЫХ И ТРЕХТАКТНЫХ МАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Существует много вариантов конструктивного исполнения и схем включения МУ. Так, иногда возникает необходимость в том, чтобы изменение направления тока I приемника постоянного тока либо изменение на 180° фазы тока приемника переменного тока. В этих случаях применяют так называемые двухтактные или реверсивные МУ.

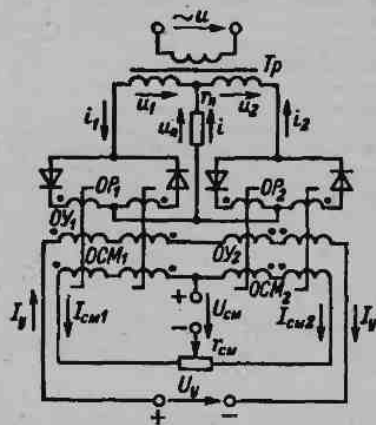


Рис. 30. Схема двухтактного МУ

С помощью двухтактного МУ можно получить характеристику управления, изображенную на рисунке 30. При этом отрицательное значение тока I_{cp} при $I_y < 0$ означает изменение на 180° фазы тока приемника в случае МУ с выходом на переменном токе (рис. 30) и изменение направления тока приемника в случае МУ с выходом на постоянном токе.

Двухтактные МУ получают путем соответствующего соединения однократных усилителей. Одна из схем двухтактных МУ приведена на рисунке 30.

Для повышения коэффициента усиления в цепи двухтактного МУ применена внутренняя обратная связь. Обмотки смещения позволяют получить (при неидентичности характеристик управления однократных МУ) при $I_y = 0$ ток приемника $I_{cp} = 0$. Последнее осуществляется путем воздействия на резистор r_{cm} .

Для регулирования тока, напряжения или мощности трехфазных приемников используются трехфазные МУ либо три однофазных. Трехфазные или однофазные МУ, соединяемые по трехфазным схемам, могут иметь выход также и на постоянном токе.

Каждая фаза трехфазного МУ имеет два магнитопровода, на которых размещены рабочие обмотки. Для улучшения охлаждения рабочая обмотка, расположенная на каждом магнитопроводе, разбита на две секции, размещенные в двух стержнях магнитопровода. Обмотки управления различного назначения охватывают шесть стержней магнитопроводов всех фаз.

ветствующие названия (обмотка управления, обмотка обратной связи по току, обмотка смещения и т. д.).

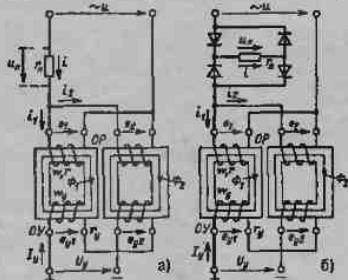


Рис. 29. Схемы МУ с выходом на переменном (а) и постоянном (б) токах

Для выяснения принципа действия МУ рассмотрим зависимость тока i рабочей цепи от степени подмагничивания магнитопроводов постоянным током управления I_y . Будем считать сначала, что потери мощности в магнитопроводе, потоки рассеяния и активные сопротивления рабочих обмоток и потребителя равны нулю. На основании известных соотношений для идеализированной катушки с ферромагнитным магнитопроводом можно утверждать следующее.

Если напряжение источника изменяется по закону $u = U_m \sin(\omega t + \pi/2)$, то при сделанных допущениях $e_1 = e_2 = -u = E_m \sin(\omega t + \pi/2)$,

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= \Phi_m \sin \omega t + \Phi_0, \\ \Phi_2 &= \Phi_m \sin \omega t - \Phi_0,\end{aligned}$$

где Φ_0 — постоянная составляющая магнитных потоков; при отсутствии подмагничивания постоянным током ($I_y = 0$) $\Phi_0 = 0$.

Фазные токи I_a , I_b и I_c в общем случае не равны линейным токам I_{ab} , I_{bc} и I_{ca} . Применяя первый закон Кирхгофа к узловым точкам a, b, c , можно получить следующие соотношения между линейными и фазными токами: $I_a = I_{ab} - I_{ca}$; $I_b = I_{bc} - I_{ab}$; $I_c = I_{ca} - I_{bc}$.

Используя указанные соотношения и имея векторы фазных токов, нетрудно построить векторы линейных токов.

При симметричной нагрузке в отношении любой фазы справедливы все формулы, полученные ранее для однофазных цепей, например:

$$\begin{aligned}I_m &= U_m / Z_m; \varphi_m = \arcsin \frac{X_m}{Z_m}; P_m = U_m I_m \cos \varphi_m = I_m^2 r_m; \\ Q_m &= U_m I_m \sin \varphi_m = I_m^2 X_m; S_m = U_m I_m^2 = I_m Z_m = \sqrt{P_m^2 + Q_m^2}.\end{aligned}$$

При симметричной нагрузке:

$$\begin{aligned}I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_\phi; \varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi_\phi; P_{ab} = P_{bc} = \\ = P_{ca} = P_\phi; Q_{ab} = Q_{bc} = Q_{ca} = Q_\phi; S_{ab} = S_{bc} = S_{ca} = S_\phi.\end{aligned}$$

При несимметричной нагрузке:

$$\begin{aligned}P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}; Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca}; I_m = U_m / Z_m; \\ S_m = U_m I_m; P_m = \operatorname{Re} S_m; Q_m = \operatorname{Im} S_m; S_m = \sqrt{P_m^2 + Q_m^2}.\end{aligned}$$

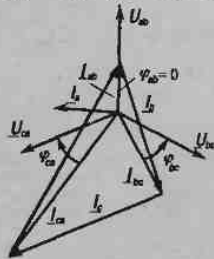


Рис. 28. Соединение фаз приемника треугольником

25. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Принцип действия **магнитоэлектрических** приборов основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и обмотки с током. В воздушном зазоре 1 (рис. 31) между неподвижным стальным цилиндром 2 и полюсными наконечниками *NS* неподвижного постоянного магнита расположена алюминиевая рамка с обмоткой 3, состоящей из ω витков изолированной проволоки.



Рис. 31. Магнитоэлектрическая система

Рамка жестко соединена с двумя полюсами *O* и *O'*, которые своими концами опираются о подшипники. На полюсы *O* закреплены указательная стрелка 4 и две спиральные пружинки 5 и 5', через которые к катушке подводится измеряемый ток *I*, противовесы 6. Полюсные наконечники *NS* и стальной цилиндр 2 обеспечивают в зазоре 1 равномерное радиальное магнитное поле с индукцией *B*. В результате взаимодействия магнитного поля с током в проводниках обмотки 3 создается вращающий момент. Рамка с обмоткой при этом поворачивается, и стрелка от-

26. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Принцип действия электромагнитных приборов основан на **втягивании стального сердечника в неподвижную обмотку с током**. Неподвижный элемент прибора — обмотка 1, выполненная из изолированной проволоки, включается в электрическую цепь (рис. 32).



Рис. 32. Устройство электроизмерительного прибора электромагнитной системы

Подвижный элемент — стальной сердечник 2, имеющий форму лепестка, он эксцентрично укреплен на оси *O*. С этой же осью жестко соединены указательная стрелка 3, спиральная пружинка 4, обеспечивающая противодействующий момент, и поршень 5 успокоителя. Ток *I* в витках обмотки 1 образует магнитный поток, сердечник 2 намагничивается и втягивается в обмотку. При этом ось *O* поворачивается, и стрелка прибора отклоняется на угол β .

Магнитная индукция *B* в сердечнике (при отсутствии насыщения) пропорциональна току обмотки. Сила *F*, с которой сердечник втягивается в обмотку, зависит от тока и магнитной индукции *B* в сердечнике. Приблизительно можно принять, что сила *F*, а сле-

27. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Приборы этой системы (рис. 33) состоят из двух обмоток: неподвижной (рис. 33а) и подвижной (рис. 33б). Подвижная обмотка укреплена на оси *OO'* и расположена внутри неподвижной обмотки. На оси *OO'* подвижной обмотки укреплены указательная стрелка 3 и спиральные пружинки 4 и 4', через которые подводится ток к обмотке 2. Эти же пружинки создают противодействующий момент $M_{пр}$, пропорциональный углу закручивания α . Принцип действия прибора (рис. 33б) основан на взаимодействии тока *I* 2 подвижной обмотки с магнитным потоком Φ_1 неподвижной обмотки.

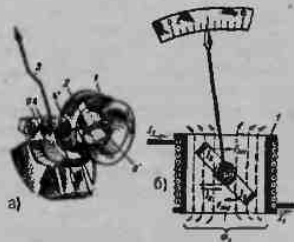


Рис. 33. Устройство электроизмерительного прибора электродинамической системы (а); пояснение принципа действия прибора (б)

При постоянном токе **электромагнитная сила $F_{эм}$** , действующая на проводники подвижной обмотки, пропорциональна току и магнитному потоку Φ_1 . Поскольку поток Φ_1 пропорционален току *I* 1 неподвижной обмотки, вращающий момент, действующий

щий на подвижную обмотку, пропорционален произведению токов обмоток:

$$M_{\text{пр}} = C' \Phi_1 I_2 = C'' I_1 I_2,$$

где C и C' — коэффициенты пропорциональности.

При переменном токе вращающий момент пропорционален произведению мгновенных значений токов:

$$i_1 = I_{1m} \sin \omega t \text{ и } i_2 = I_{2m} \sin (\omega t + \psi).$$

Показание прибора в этом случае определяется средним за период значением вращающего момента:

$$M_{\text{пр}} = \frac{1}{T} \int_0^T C'' I_1 I_2 dt = C I_1 I_2 \cos \psi,$$

где C — коэффициент, зависящий от числа витков, геометрических размеров и расположения катушек;

I_1 и I_2 — действующие значения токов в обмотках;

ψ — угол сдвига фаз между векторами токов I_1 и I_2 .

При равенстве моментов ($M_{\text{пр}} = M_{\text{вп}}$) подвижная обмотка отклоняется на угол α и стрелка указывает на шкалу числовое значение измеряемой электрической величины. Для успокоения подвижной части прибора используют воздушные демпферы. Электродинамические приборы применяют для измерения мощности, тока и напряжения в цепях переменного тока.

Приборы электродинамической системы обладают высокой точностью (обусловленной отсутствием ферромагнитных сердечников) и могут быть использованы для измерения электрических величин в цепях постоянного и переменного тока. Недостатками приборов являются чувствительность к перегрузкам и влияние посторонних магнитных полей на точность измерений. Приборы этой системы используются в качестве амперметров, вольтметров и ваттметров.

довательно, и обусловленный ею вращающий момент пропорциональны квадрату тока в катушке:

$$M_{\text{пр}} = C \Phi^2.$$

Противодействующий момент, уравновешивающий вращающий момент, пропорционален углу α . В связи с этим угол отклонения стрелки находится в квадратичной зависимости от тока; шкала прибора оказывается неравномерной.

Для успокоения подвижной части прибора обычно применяют воздушный демпфер. Он состоит из цилиндра 6 и поршня 5, шток которого укреплен на оси O . Сопротивление воздуха, оказываемое перемещению поршня в цилиндре, обеспечивает быстрое успокоение стрелки.

Достоинства приборов электромагнитной системы — простота конструкции, пригодность для измерения в цепях постоянного и переменного тока, надежность в эксплуатации. К недостаткам относятся неравномерность шкалы, влияние посторонних магнитных полей на точность показаний. Последнее обусловлено тем, что магнитное поле обмотки расположено в воздушной среде и поэтому его магнитная индукция невелика.

Для ослабления влияния посторонних магнитных полей в некоторых приборах на оси подвижной части укреплены два одинаковых сердечника, каждый из них размещен в магнитном поле соответствующей обмотки (1 и 2), которые включены между собой последовательно. **Направление намотки** обмоток выполнено так, что их магнитные поля Φ_1 и Φ_2 направлены в противоположные стороны. Моменты, созданные магнитными полями каждой обмотки, действуют на ось согласно $M_{\text{пр}1} + M_{\text{пр}2} = M_{\text{пр}}$. Постороннее магнитное поле $\Phi_{\text{п}}$ ослабляет поток Φ_1 , но усиливает поток Φ_2 . В результате обций вращающий момент $M_{\text{пр}}$ остается неизменным и зависит от измеряемого тока I . Приборы такой конструкции называются астатическими. Для уменьшения погрешности измерений, вносимой посторонними магнитными полями, некоторые приборы экранируют, помещая их в стальные корпуса.

клоняется на угол α . Электромагнитная сила $F_{\text{эм}}$, действующая на обмотку, равна $F_{\text{эм}} = \omega B I l$.

Вращающий момент, создаваемый силой $F_{\text{эм}}$, равен:

$$M_{\text{пр}} = F_{\text{эм}} d = \omega B I l d = C_1 I_1,$$

где d и l — ширина и длина рамки (обмотки);

C_1 — коэффициент, зависящий от числа витков ω , размеров обмотки и магнитной индукции B .

В приборах магнитоэлектрической системы успокоение (демпфирование) стрелки происходит благодаря тому, что при перемещении алюминиевой рамки в магнитном поле постоянного магнита NS в ней индуцируются вихревые токи. В результате взаимодействия этих токов с магнитным полем возникает момент, действующий на рамку в направлении, противоположном ее перемещению, что и приводит к быстрому успокоению колебаний рамки.

Измерительные приборы магнитоэлектрической системы находят применение также при измерениях в цепях переменного тока. При этом в цепь подвижной катушки включают преобразователи переменного тока в постоянный или пульсирующий ток. Наибольшее распространение получили **выпрямительная и термоэлектрическая** системы.

Вольтметры и амперметры выпрямительной и термоэлектрической системы применяются для измерений в цепях переменного тока как промышленных тока, так и тока повышенных частот.

Достоинства приборов магнитоэлектрической системы — точность показаний, малая чувствительность к посторонним магнитным полям, незначительное потребление мощности, равномерность шкалы. К недостаткам следует отнести необходимость применения специальных преобразователей при измерениях в цепях переменного тока и чувствительность к перегрузкам (тонкие токопроводящие пружинки 5 и 5' из фосфористой бронзы при перегрузках нагреваются и изменяют свои упругие свойства).

28. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Показания электроизмерительных приборов несколько отличаются от действительных значений измеряемых величин. Это вызвано непостоянством параметров измерительной цепи (изменением температуры, индуктивности и т. п.), несовершенством конструкции измерительного механизма (наличие трения и т. д.) и влиянием внешних факторов (внешних магнитных и электрических полей, изменений температуры окружающей среды и т. д.).

Разность между измеренным A_u и действительным A_d значениями контролируемой величины называется абсолютной погрешностью измерения: $\Delta A = A_u - A_d$.

Если не учитывать значения измеряемой величины, то абсолютная погрешность не дает представления о степени точности измерения. Предположим, что абсолютная погрешность при измерении напряжения составляет $\Delta U = 1$ В. Если указанная погрешность получена при измерении напряжения в 100 В, то измерение произведено с достаточной степенью точности. Если же погрешность $\Delta U = 1$ В получена при измерении напряжения в 2 В, то степень точности недостаточна. Поэтому погрешность измерения принято оценивать не абсолютной, а относительной погрешностью.

Относительная погрешность измерения представляет собой отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины, выраженное в процентах:

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_d} \times 100\% = \frac{A_u - A_d}{A_d} \times 100\%.$$

29. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА

В установках постоянного тока для этой цели применяются главным образом приборы магнитоэлектрической системы и реже — приборы электромагнитной системы. В установках переменного тока используются преимущественно амперметры электромагнитной системы. Для уменьшения погрешности измерения необходимо, чтобы сопротивление **амперметра** (или полное сопротивление амперметра и шунта) было на два порядка меньше сопротивления любого элемента измеряемой цепи.

Для расширения предела измерения **амперметра** (в k раз) в цепях постоянного тока служат шунты-резисторы, включаемые параллельно амперметру (рис. 34).

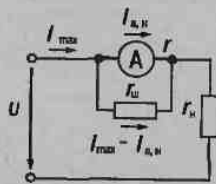


Рис. 34. Схема присоединения шунта к амперметру

Сопротивление шунта определяется из соотношения

$$r_{ш} (I_{max} - I_{н.н.}) = r_{н.н.} I_{н.н.}$$

где I_{max} — наибольшее значение тока в контролируемой цепи (предел измерения тока амперметром при наличии шунта);

$I_{н.н.}$ — предельное (номинальное) значение тока прибора при отсутствии шунта.

30. ИЗМЕРЕНИЕ НАПЯЖЕНИЯ

Для измерения значения напряжения на каком-либо элементе электрической цепи (генераторе, трансформаторе, нагрузке) к выводам элемента присоединяют вольтметр. Для уменьшения погрешности измерения необходимо, чтобы сопротивление вольтметра (или общее сопротивление вольтметра и добавочного резистора) было на два порядка больше сопротивления любого элемента измеряемой цепи.

Индуктивность катушки амперметра при переменном токе зависит от значения тока; соотношение токов в катушке амперметра и шунте здесь не остается постоянным. Поэтому шунты в цепях переменного тока не применяются.

Для расширения предела измерения вольтметра (в k раз) в цепях напряжением до 500 В обычно применяют добавочные резисторы, включаемые последовательно с обмоткой вольтметра (рис. 35).

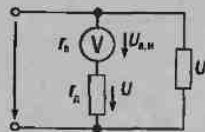


Рис. 35. Схема присоединения добавочного резистора к вольтметру

Сопротивление добавочного резистора $r_д$ определяют из соотношения

$$\frac{r_д + r_в}{r_в} = \frac{U_{max}}{U_{н.н.}}$$

где U_{max} — наибольшее значение измеряемого напряжения (предел измерения напряжения вольтметром при наличии добавочного резистора);

$U_{н.н}$ — предельное (номинальное) значение напряжения прибора при отсутствии добавочного резистора.

Отсюда:

$$r_d = r_a \frac{U_{max} - U_{н.н}}{U_{н.н}}$$

Значение фактически измеряемого напряжения U определяется из соотношения

$$\frac{U}{U_в} = \frac{U_{max}}{U_{н.н}} = \frac{r_d + r_a}{r_a} = k, U = kU_в,$$

где $U_в$ — показание вольтметра.

Шкалу вольтметра градуируют с учетом включенного добавочного резистора.

В целях переменного тока высокого напряжения для расширения пределов измерения вольтметров применяют трансформаторы напряжения.

В измерительной технике и особенно в автоматических устройствах широко используется **метод сравнения**. В основе этого метода лежит сравнение измеряемой величины с известной идентичной физической величиной. Из области неэлектрических измерений можно, например, указать известный способ определения при помощи чашечных весов массы (веса) какого-либо предмета путем сравнения его с массой (весом) гирь в момент равновесия.

В электроизмерительной технике различают две разновидности метода сравнения: **мостовой** и **компенсационный**. Примером мостового метода является измерение сопротивления при помощи **четырёхплечевой мостовой** схемы. Примером компенсационного метода может служить измерение напряжения путем сравнения с известной ЭДС нормального элемента. Методы сравнения отличаются большой точностью, но техника этих измерений сложнее техники измерений методом непосредственной оценки.

$$\text{Отсюда } r_{ш} = r_a \frac{I_{н.н}}{I_{max} - I_{н.н}},$$

где $I_{н.н}$ — показание амперметра.

Шкалу амперметра часто градуируют с учетом включенного шунта; тогда значение измеряемого тока I считается непосредственно по шкале прибора.

В цепях переменного тока для расширения пределов измерения амперметров используют трансформаторы тока.

Методы измерений. На практике применяют различные методы измерения электрических величин. Наибольшие распространение в электроизмерительной технике получил **метод непосредственной оценки**. При использовании этого метода числовое значение измеряемой величины определяют непосредственно по показанию прибора, шкала которого отградуирована в единицах измеряемой величины. К подобным измерениям относят определение тока по показанию амперметра, напряжения по показанию вольтметра, мощности по показанию ваттметра, сопротивления по показанию омметра, $\cos \varphi$ по показанию фазометра и т. д.

В некоторых случаях электрическую величину приходится определять косвенно — по данным измерений других электрических величин. Так, значение $\cos \varphi$ находят по измеренным величинам мощности P , напряжения U и тока I , значение сопротивления — по измеренным величинам U и I и т. д. Это **косвенный метод измерения**.

В измерительной технике и особенно в автоматических устройствах широко используется **метод сравнения**. В основе этого метода лежит сравнение измеряемой величины с известной идентичной физической величиной. Из области неэлектрических измерений можно, например, указать известный способ определения при помощи чашечных весов массы (веса) какого-либо предмета путем сравнения его с массой (весом) гирь в момент равновесия.

В электроизмерительной технике различают две разновидности метода сравнения: **мостовой** и **компенсационный**.

Поскольку действительное значение измеряемой величины при измерении не известно, для определения ΔA и u можно воспользоваться классом точности прибора, представляющим собой обобщенную характеристику средств измерений, определяемую предельными допустимыми погрешностями.

Амперметры, вольтметры и ваттметры подразделяются на восемь классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Цифра, обозначающая класс точности, определяет наибольшую положительную или отрицательную основную приведенную погрешность, которую имеет данный прибор.

Под основной приведенной погрешностью прибора понимают абсолютную погрешность, выраженную в процентах по отношению к номинальной величине прибора:

$$g_{пр} = \frac{\Delta A}{A_{ном}} \times 100\% = \frac{A_n - A_d}{A_{ном}} \times 100\%.$$

Например, прибор класса точности 0,5 имеет $g_{пр} = \pm 0,5\%$.

31. ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ

Измерение активной мощности в цепях однофазного тока. Для измерения мощности P служат ваттметры электродинамической системы; схема включения ваттметра изображена на рисунке 36. неподвижная обмотка 1—1 прибора называется токовой и включается в цепь последовательно. Подвижная обмотка 2—2 называется обмоткой напряжения и включается в цепь параллельно.

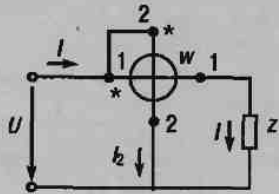


Рис. 36. Схема включения ваттметра

Ток I_2 в обмотке напряжения 2—2 пропорционален напряжению U контролируемой цепи и совпадает с ним по фазе, а ток I_1 равен току I нагрузки. Момент, действующий на подвижную обмотку, равен

$$M_{\text{пр}} = CU I_1 \cos \varphi = CP,$$

где C — коэффициент пропорциональности.

Поскольку противодействующий момент $M_{\text{пр}}$ пропорционален углу поворота а стрелки, отклонение стрелки пропорционально измеряемой активной мощности P .

Для правильного включения ваттметра один из выводов токовой обмотки и один из выводов обмотки напряжения отмечают звездочками (*). Эти вы-

32. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Встречающиеся в электротехнике резисторы по значению их сопротивлений можно условно разделить на малые (до 1 Ом), средние (от 1 до 10 Ом) и большие (свыше 10 Ом). В зависимости от значения измеряемого сопротивления используются различные средства и методы измерения.

Измерение сопротивлений амперметром и вольтметром. Наиболее просто сопротивление резисторов можно измерить с помощью амперметра и вольтметра. Применяются две схемы включения приборов, указанные на рисунке 37а и 37б.

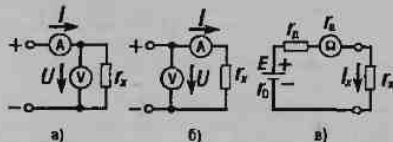


Рис. 37. Измерение небольших (а), средних и больших (б) сопротивлений амперметром и вольтметром; измерение сопротивлений омметром (в)

Анализ этих схем с помощью уравнений Кирхгофа показывает, что для получения более точных результатов при измерении средних и больших сопротивлений следует применять схему (рис. 37б), а при измерении небольших сопротивлений — другую схему (рис. 37а). Искомое сопротивление определяется по формуле:

$$r_x = U / I,$$

где U и I — показания приборов.

Измерение сопротивлений омметром. Для непосредственного измерения сопротивления ре-

33. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

Электронно-лучевой осциллограф используется для визуального наблюдения и регистрации формы и параметров электрических сигналов в диапазоне частот от постоянного тока до десятков мегагерц.

Функциональная схема электронно-лучевого осциллографа приведена на рисунке 38. Основным узлом осциллографа является вакуумная электронно-лучевая трубка ЭЛТ, которая преобразует электрические сигналы в световое изображение. Катод 2, подогреваемый нитью накала 1, является источником свободных электронов, которые формируются в электронный луч и фокусируются первым анодом 4 на экране 8 ЭЛТ. Ускорение электронов луча осуществляется вторым анодом 5. При соударении электронов с экраном 8 их кинетическая энергия преобразуется в световое излучение посредством катодолуминофоров, т. е. веществ, светящихся под действием бомбардировки их электронами. Время послесвечения (после прекращения действия электронного луча) может составлять от 0,05 до 20 с и более.

Изменяя отрицательный потенциал электрода 3 по отношению к катоду, можно воздействовать на значение тока электронного луча, а следовательно, и на яркость свечения изображения на экране.

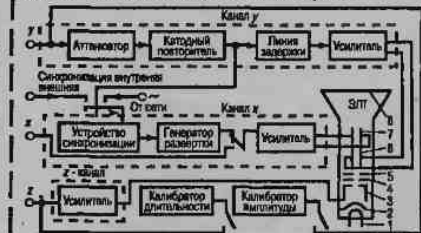


Рис. 38. Схема электронно-лучевого осциллографа

Управление пучком ЭЛТ осуществляется посредством трех каналов управления x , y , z , которые обеспечивают получение развернутого изображения исследуемого электрического сигнала в функции времени. Канал y осуществляет вертикальное отклонение луча по оси y системы координат и непосредственно связан с исследуемым сигналом. Канал x обеспечивает горизонтальное отклонение луча по оси времени x системы координат. Канал z управляет яркостью луча.

Для создания линейного масштаба по оси времени x необходимо равномерное перемещение электронного луча по горизонтали, что обеспечивается подачей на горизонтально отклоняющие пластины 7 ЭЛТ линейно нарастающего напряжения развертки. Если при этом отсутствует напряжение на вертикально отклоняющих пластинах 6, на экране осциллографа появляется горизонтальная линия. При одновременной подаче исследуемого напряжения на пластины 6 и напряжения развертки на экране осциллографа появляется осциллограмма, дающая полное представление о форме, амплитуде, частоте исследуемого напряжения.

В канале x частота генератора развертки недостаточно стабильна. Для получения устойчивого изображения на экране осциллографа необходимо выполнение равенства:

$$T_x = nT_r$$

где T_x — период напряжения развертки;
 T_r — период исследуемого напряжения;
 $n = 1, 2, 3, \dots$

Это равенство обеспечивается устройством синхронизации, которое «подстраивает» частоту генератора развертки под частоту исследуемого напряжения.

Если «подстройка» производится исследуемым сигналом, то она называется внутренней синхронизацией, если от какого-либо другого сигнала — внешней синхронизацией.

С целью определения масштаба осциллограмм по осям абсцисс и ординат в осциллографе предусмотрены калибраторы длительности и амплитуды.

зисторов применяют омметр, состоящий из магнитозлектрического миллиамперметра, последовательно с обмоткой которого r_a включается добавочный резистор r_d и источник питания (батарея) с ЭДС E и внутренним сопротивлением r_0 (рис. 37в).

При постоянстве ЭДС E показание прибора зависит только от r_d : каждому значению измеряемого сопротивления соответствует определенное значение тока I_x в цепи:

$$I_x = \frac{E}{(r_a + r_d + r_0) + r_x}$$

Это позволяет отградуировать шкалу прибора непосредственно в омах.

Из-за того что ЭДС E источника питания может изменяться в процессе эксплуатации прибора, значение тока неоднозначно определяет измеряемую величину.

На практике применяют омметры, в которых отклонение стрелки не зависит от значения ЭДС (напряжения) источника питания. В качестве измерительного механизма здесь используется логометр — прибор, у которого отсутствует механическое устройство для создания противодействующего момента. В логометре равновесное положение подвижной системы определяется отношением токов в двух подвижных и жестко связанных между собой обмотках — **рамках**.

Для измерения больших сопротивлений (например, сопротивления изоляции проводов) служит **мегаомметр**. Он отличается от омметра тем, что в качестве источника питания здесь используется магнитозлектрический генератор, приводимый во вращение рукой. ЭДС генератора достигает довольно высоких значений (500–2000 В), благодаря чему **мегаомметром** можно приблизительно измерять сопротивления, исчисляемые мегаОмами (МОм).

воды, называемые **генераторными**, необходимо включать со стороны источника питания.

Следует отметить, что электродинамическими ваттметрами можно измерять также мощность в цепях постоянного тока.

Измерение активной и реактивной мощностей в цепях трехфазного тока. Для измерения мощности трехфазного приемника применяют различные схемы включения ваттметров.

При симметричной нагрузке активную мощность P можно измерить одним ваттметром.

Общая мощность потребителя:

$$P = 3W,$$

где W — показание ваттметра.

При несимметричной нагрузке мощность трехфазного приемника можно измерить тремя ваттметрами. Общая мощность приемника в этом случае:

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

В **трехпроводных** системах трехфазного тока при симметричной и несимметричной нагрузках и любом способе соединения приемников широко распространена схема измерения мощности двумя ваттметрами.

Ток совпадает по фазе с напряжением, потому что цепь обмотки напряжения ваттметра обладает практически чисто активным сопротивлением.

Токовые обмотки могут быть включены и в другие линейные провода, например в A и C . При этом параллельные обмотки ваттметров включаются на линейные U_{AB} и U_{CB} .

34. НАЗНАЧЕНИЕ, УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

С целью экономичной передачи электроэнергии на дальние расстояния и распределения ее между разнообразными потребителями появляется необходимость в ее трансформации. Последнее осуществляется с помощью повышающих и понижающих трансформаторов.

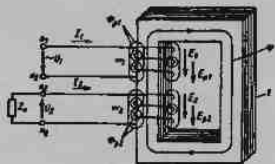


Рис. 39. Пояснение устройства и принципа действия трансформатора

Трансформатор – статический электромагнитный аппарат, его действие основано на явлении взаимной индукции, он предназначен для преобразования электрической энергии переменного тока с параметрами U_1, I_1 в энергию переменного тока с параметрами U_2, I_2 той же частоты.

Трансформатор (рис. 39) состоит из ферромагнитного магнитопровода 1, собранного из отдельных листов электротехнической стали, на котором расположены две (ω_1, ω_2) обмотки, выполненные из медного или алюминиевого провода. Обмотку, подключенную к источнику питания, принято называть первичной, а обмотку, к которой подключаются приемники, – вторичной. Все величины, относящиеся к первичной и вторичной обмоткам, принято соответственно обозначать индексами 1 и 2.

35. ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Создание трехфазных трансформаторов относится к периоду 1889–1891 гг. Первые промышленные образцы трансформаторов созданы выдающимся русским электротехником **М. О. Дольво-Добровольским**.

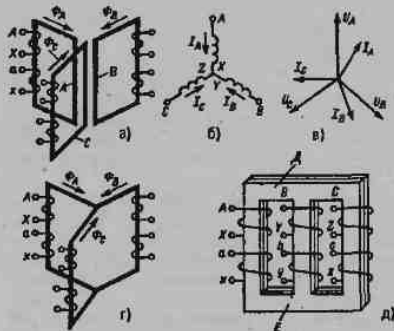


Рис. 40. Трехфазный трансформатор

Трехфазный трансформатор состоит из трех однофазных, магнитопроводы которых объединены в один общий трехстержневой (рис. 40д). Действительно, если три однофазных двухобмоточных трансформатора расположить, как изображено на рисунке 40а, а их первичные обмотки соединить звездой (рис. 40б) и подключить к трехфазной сети, то в них возникнут токи холостого хода. Токи будут

36. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И КПД ТРАНСФОРМАТОРА

В трансформаторе теряется энергия в обмотках и в магнитопроводе. Потери мощности в обмотках равны:

$$\Delta P_{\text{м}} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 = I_2^2 r_{\Sigma}$$

Потери мощности в магнитопроводе составляют (см. рис. 41):

$$\Delta P_{\text{ст}} = GB_m^2 \Delta P_{10} \left(\frac{f}{50} \right)^{1.5};$$

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

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 $B_m = 1,5$ Тл и $f = 50$ Гц;

f – частота тока в обмотках, Гц.

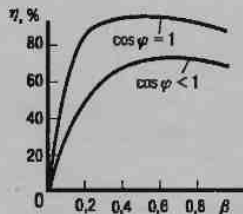


Рис. 41. График потери мощности

Потери в обмотках зависят от нагрузки, потери в магнитопроводе практически не зависят от нагрузки. Коэффициент полезного действия трансформатора равен:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_M + \Delta P_{CT}}$$

где P_2 — мощность, отдаваемая трансформатором;
 P_1 — потребляемая мощность.

Выразив активную мощность, отдаваемую трансформатором, через полную мощность $P_2 = S_2 \cos \varphi_2$, получим:

$$\eta = \frac{S_2 \cos \varphi_2}{S_2 \cos \varphi_2 + I_2^2 r_k + \Delta P_{CT}}$$

Выразив S_2 и I_2 через коэффициент загрузки трансформатора β , имеем $M_2 = \beta I_{2ном}$, что соответствует $S_2 \approx \beta S_{ном}$ и так как $U_2 \approx U_{ном}$, получим:

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + \Delta P_e \beta^2 + \Delta P_{CT}}$$

где $\Delta P_e = \Delta P_{ном} = F_{ном} r_k$ — потери мощности в обмотках при номинальной нагрузке;

ΔP_{CT} — потери мощности в магнитопроводе при номинальном напряжении.

Трансформаторы большой мощности при номинальной нагрузке и $\cos \varphi_2 = 1$ обладают высоким КПД, достигающим до 0,98–0,99. Трансформаторы малой мощности имеют КПД примерно 0,82–0,9.

иметь одинаковое значение, но будут сдвинуты друг относительно друга на 120° (рис. 40в). Магнитные потоки, создаваемые токами, также будут сдвинуты на 120° . Сумма магнитных потоков, так же как и токов, будет равна нулю. Если объединить три стержня ABC однофазных трансформаторов в один, то в этом стержне магнитного потока не будет, и надежность в нем отпадает. В результате образуется трехфазный трансформатор (рис. 40г). Но изготовление такого трансформатора технически и технологически затруднено. Действительно, гораздо удобнее расположить стержни магнитопровода в одной плоскости, как изображено на рисунке 40д. По сути дела, ничего не изменится. Но при этом немного уменьшится длина магнитопровода для среднего стержня B . Это несколько нарушит симметрию магнитопровода трансформатора и приведет к тому, что намагничивающий ток (ток холостого хода) обмотки среднего стержня B будет несколько меньше, чем ток обмоток стержней A и C , но асимметрия не имеет практического значения.

Итак, трехфазный двухобмоточный трансформатор (рис. 40д) имеет один трехстержневой магнитопровод с двумя обмотками на каждом из стержней. Каждая фаза трехстержневого трансформатора представляет собой по существу однофазный трансформатор. Поэтому анализ работы и расчет трехфазных трансформаторов при равномерной нагрузке каждой фазы аналогичны однофазным и схема замещения изображается для одной фазы.

Начала и концы первичных обмоток обозначаются большими буквами — соответственно A, B, C , вторичных обмоток — малыми буквами a, b, c . Фазы вторичных обмоток, так же как и первичных, могут быть соединены звездой или треугольником.

Если первичную обмотку трансформатора с числом витков ω_1 включить в сеть переменного тока, то напряжение сети U_1 вызовет в ней ток I_1 и МДС $I_1 \omega_1$, создаст переменный магнитный поток Φ . Переменный магнитный поток Φ создаст в обмотке ω_1 ЭДС E_1 , а в обмотке ω_2 — ЭДС E_2 . Когда есть нагрузка, электрическая цепь вторичной обмотки оказывается замкнутой, и ЭДС E_2 вызовет в ней ток I_2 . Таким образом, электрическая энергия первичной цепи с параметрами U_1, I_1 и частотой f будет преобразована в энергию переменного тока вторичной цепи с параметрами U_2, I_2 и f .

$$e_1 = -\omega_1 dF / dt, \quad e_2 = -\omega_2 dF / dt.$$

Их действующие значения (при синусоидальном изменении) соответственно равны:

$$E_1 = 4,44 \omega_1 f F_m, \\ E_2 = 4,44 \omega_2 f F_m.$$

Разделив значения ЭДС первичной цепи на соответствующее значение ЭДС вторичной цепи, получим

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = n.$$

Величина n называется коэффициентом трансформации трансформатора. Электрическая энергия из первичной цепи во вторичную в трансформаторе передается посредством переменного магнитного потока, поскольку гальваническая связь между первичной и вторичной обмотками трансформатора отсутствует. Отношение значений ЭДС E_1 и E_2 равно отношению числа витков первичной и вторичной обмоток.

37. НАЗНАЧЕНИЕ И УСТРОЙСТВО МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Машины постоянного тока используют в качестве генераторов и двигателей.

Электрическая энергия постоянного тока, вырабатываемая генераторами, служит для питания двигателей постоянного тока, электролитических ванн, электромагнитов различного назначения, аппаратуры управления и контроля и т. д. В настоящее время генераторы постоянного тока во многих установках заменяют полупроводниковыми преобразователями переменного тока в постоянный.

Двигатели постоянного тока применяют на транспорте, для привода некоторых металлорежущих станков, прокатных станков, подъемно-транспортных машин, экскаваторов и т. д. Одной из главных причин применения двигателей постоянного тока вместо наиболее широко распространенных асинхронных двигателей является возможность плавного регулирования частоты вращения в широком диапазоне и получения желаемых механических характеристик $n(M)$.

Генераторы и двигатели постоянного тока устроены одинаково. неподвижная часть машины, называемая статором, состоит из массивного стального корпуса, к которому прикреплены главные полюсы и дополнительные полюсы. Исходя из технологических и других соображений главные полюсы изготавливают чаще из отдельных стальных листов; иногда их изготавливают сплошными. Перечисленные детали статора являются также и деталями его магнитопровода. На главных полюсах размещают катушки одной или нескольких обмоток возбуждения, на дополнительных полюсах — катушки обмотки дополнительных полюсов.

38. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРА И ДВИГАТЕЛЯ

Допустим, что якорь машины вращается с помощью какого-то двигателя в направлении, указанном стрелкой. Если щетки генератора соединить с каким-либо приемником r , то под действием ЭДС генератора в обмотке якоря и приемника появится ток, приемник начнет потреблять электрическую энергию, т. е. будет работать в качестве генератора. Электрическая энергия, вырабатываемая генератором, преобразуется из механической энергии двигателя, вращающего якорь генератора.

Направление тока в проводниках обмотки якоря генератора совпадает с направлением ЭДС проводников и при вращении якоря изменяется. С помощью коллектора изменяющийся по направлению ток проводников преобразуется в неизменные по направлению токи параллельных ветвей $i_{\text{вв}}$ и ток внешней цепи i , называемый током якоря. Согласно первому закону Кирхгофа для рассматриваемого генератора $i = 2i_{\text{вв}}$. Машины постоянного тока могут иметь число параллельных ветвей больше двух. Обозначив в общем случае число параллельных ветвей $2a$, получим $i_a = 2ai_{\text{вв}}$.

Если воспользоваться правилом левой руки, установим, что генератор развивает электромагнитный момент, направленный против направления вращения, т. е. является тормозящим.

Изменение полярности щеток и, следовательно, направлений ЭДС, напряжения и тока во внешней цепи генератора можно произвести одним из двух способов:

- 1) изменением направления магнитного поля главных полюсов, что осуществляется изменением направления тока обмотки возбуждения, расположенной на главных полюсах;
- 2) изменением направления вращения якоря генератора с помощью приводного двигателя.

39. ЭДС ЯКОРЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

ЭДС проводника обмотки якоря определяется по формуле $e = Blv$.

При вращении якоря ЭДС e изменяется. Среднее значение ЭДС проводника $e_{\text{ср}}$ при его перемещении в пределах полного деления можно определить через среднее значение магнитной индукции: $e_{\text{ср}} = B_{\text{ср}}lv$.

Если обмотка якоря имеет N проводников и $2a$ параллельных ветвей, то число последовательно соединенных проводников в каждой параллельной ветви будет $N/2a$. Тогда среднее значение ЭДС машины:

$$E = B_{\text{ср}}lv \frac{N}{2a}$$

Среднее значение магнитной индукции:

$$B_{\text{ср}} = \frac{\Phi}{\pi D_a l / 2p}$$

где Φ — магнитный поток одного полюса;

D_a — диаметр якоря, м;

$2p$ — число полюсов машины.

Величина $\pi D_a l / 2p$ представляет собой поверхность сердечника якоря, приходящуюся на один полюс.

Линейную скорость проводников v можно определить по формуле:

$$v = \frac{\pi D_a n}{60}$$

где n — частота вращения якоря, об/мин.

$$E = \frac{p}{a} \times \frac{N}{60} \Phi n = k_e \Phi n,$$

где $k_e = \frac{p}{a} \times \frac{N}{60}$ — коэффициент ЭДС, зависящий от конструктивных особенностей машины.

Как видно, ЭДС прямо пропорциональна произведению магнитного потока на частоту вращения. Можно определять как ЭДС генераторов, так и ЭДС двигателей.

Электромагнитная сила в ньютонах, действующая на проводник обмотки якоря, определяется соотношением:

$$F_{\text{пр}} = B I_{\text{пр}} = B I_a / 2a,$$

где $I_{\text{пр}}$ — ток проводника, равный току параллельной ветви, А;

I_a — ток якоря, А.

При вращении якоря сила, действующая на проводник, изменяется.

Среднее значение силы можно определить через среднее значение магнитной индукции:

$$F_{\text{пр ср}} = B_{\text{ср}} I_a / 2a.$$

Средний электромагнитный момент, M_m , действующий на якорь, равно:

$$M_{\text{Ф}} = F_{\text{пр ср}} \frac{D_a}{2} N = B_{\text{ср}} I_a \frac{D_a}{2a} \times \frac{D_a}{2} N;$$

$$M_{\text{эм}} = \frac{p}{a} \times \frac{N}{2\pi} \Phi I_a = k_M \Phi I_a,$$

где $k_M = \frac{p}{a} \times \frac{N}{2\pi}$ — коэффициент момента, зависящий от конструктивных особенностей машины.

Как видно, момент электромагнитный прямо пропорционален произведению магнитного потока на ток якоря. По последней формуле можно определять как момент генераторов, так и момент двигателей.

Если момент выражен в ньютон-метрах, то между коэффициентами k_g и k_M существует следующее соотношение:

$$k_g / k_M \approx 0,105.$$

Электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$, вызванный взаимодействием магнитного потока и тока якоря, отличается от момента M , развиваемого машиной на валу, вследствие трения в подшипниках, вращающегося якоря о воздух и вентиляционных потерь. Так как указанные два момента отличаются незначительно, будем в дальнейшем считать их равными и обозначать M .

Принцип действия двигателя. Предположим, что якорь той же машины неподвижен. Если от источника постоянного тока подвести к якорю двигателя напряжение, то во внешней цепи и в обмотке якоря возникнут токи, направление которых будет противоположно указанным. С помощью правила левой руки можно установить, что на якорь будет действовать вращающий электромагнитный момент, и якорь начнет вращаться против часовой стрелки. При вращении в обмотке якоря возникнет ЭДС, которая согласно правилу правой руки будет направлена против тока двигателя. Противоположные направления тока и ЭДС говорят о том, что в машине происходит преобразование электрической энергии в механическую. Двигатель разгонится до такой частоты вращения, при которой его момент станет равным моменту, обусловленному нагрузкой.

Коллектор необходим для того, чтобы неизменным по направлению ток внешней цепи преобразовывать в изменяющийся по направлению ток в проводниках обмотки якоря при его вращении, ток всех проводников, находящихся под одним полюсом, имеет одно и то же направление, т. е. остается неизменным и направление вращающего момента, развиваемого двигателем.

Для изменения направления вращения двигателя необходимо изменить направление развиваемого им вращающего момента:

- 1) изменением полярности напряжения, подводимого к якорю двигателя и, следовательно, направления тока якоря;
- 2) изменением направления магнитного потока главных полюсов.

Вывод: машины постоянного тока обратимы, при определенных условиях генераторы могут работать в качестве двигателей и наоборот.

В подшипниковых щитах, прикрепленных с торцевых сторон к корпусу, расположены подшипники, несущие вал вращающейся части машины. На валу закреплен цилиндрический сердечник якоря, который для уменьшения потерь мощности от перемагничивания и вихревых токов набирают из стальных листов. В пазах, расположенных по поверхности якоря, уложена обмотка якоря. Так же как обмотку возбуждения и обмотку дополнительных полюсов, ее изготавливают из медного изолированного провода. Выводы от обмотки якоря присоединяют к расположенному на валу коллектору. Последний представляет собой цилиндр, состоящий из медных пластин, изолированных друг от друга и от вала. К коллектору с помощью пружин прижимаются графитные, угольно-графитные или металлографитные щетки. Щетки расположены в специальных щеткодержателях.

Обмотка возбуждения машины питается постоянным током и служит для создания основного магнитного поля.

Главные полюсы имеют полюсные наконечники, служащие для получения по большей части окружности якоря одного и того же воздушного зазора между сердечником якоря и главными полюсами. Это необходимо для получения на большей части окружности якоря одной и той же магнитной индукции, а в проводниках обмотки якоря — постоянной по значению ЭДС. Дополнительные полюсы предназначены для уменьшения искрения под щетками.

С помощью коллектора и щеток вращающаяся обмотка якоря соединяется с внешней электрической цепью.

40. ЯВЛЕНИЕ КОММУТАЦИИ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Под коммутацией в машинах постоянного тока понимают процесс переключения секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую, сопровождающийся изменением направления тока в секциях.

В результате изменения тока в коммутирующей секции возникает ЭДС самоиндукции e_s .

Для увеличения механической прочности щеток их ширину выбирают больше ширины коллекторной пластины. Вследствие этого щеткой замыкаются накоротко и одновременно коммутируются несколько секций. Последнее вызывает в каждой секции ЭДС взаимной индукции. Кроме того, в секции возникает ЭДС e , вызываемая вращением секции в магнитном поле поперечной реакции якоря.

Сумма перечисленных ЭДС невелика. Поскольку секция замкнута щеткой накоротко, это приводит к заметному дополнительному току в замкнутом контуре секции, в результате плотность тока под щеткой становится неодинаковой. Под сбегающим краем щетки плотность тока возрастает, что приводит к искрению под щеткой, особенно интенсивному в момент размыкания секции. Если не принять специальных мер для улучшения условий коммутации (уменьшения искрения под щетками), то наиболее ответственная часть машины — коллектор — через непродолжительное время выйдет из строя.

Для улучшения коммутации машины мощностью 1 кВт и более снабжаются дополнительными полюсами. В машинах с дополнительными полюсами щетки устанавливают на геометрической нейтральной линии. С помощью дополнительных полюсов в зоне комму-

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

Свойства генераторов постоянного тока зависят от числа и способа подключения обмоток возбуждения или, как говорят, от способа возбуждения генераторов. В зависимости от способа возбуждения различают:

- 1) генераторы независимого возбуждения;
- 2) генераторы параллельного возбуждения (ранев шунтовые);
- 3) генераторы смешанного возбуждения (ранев компаундные).

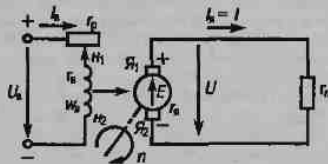


Рис. 42. Схема включения генератора независимого возбуждения

Главный магнитный поток генератора независимого возбуждения (рис. 42) возбуждается расположенной на главных полюсах обмоткой независимого возбуждения H_1, H_2 . Последняя получает питание от постороннего источника электрической энергии постоянного тока небольшой мощности. Номинальное напряжение обмотки возбуждения выбирают либо равным, либо иногда меньшим номинального напряжения якоря Y, Y_2 генератора.

Цепь обмотки возбуждения W, W_2 генератора параллельного возбуждения включают параллельно

42. ПУСК ДВИГАТЕЛЕЙ

Пуск двигателей постоянного тока производится с помощью реостата r , включаемого в цепь якоря двигателя. Необходимость в пусковом реостате может быть пояснена с помощью формулы тока.

В первое мгновение после подключения двигателя к сети $\eta = 0$ и $E = k_e \Phi \Omega = 0$. Поэтому без учета влияния индуктивности якоря начальный пусковой ток якоря будет $I_a = U / (r_a + r)$.

Если произвести пуск двигателя без пускового реостата ($r = 0$), то начальный пусковой ток будет ограничиваться лишь небольшим сопротивлением якоря, например для двигателя мощностью от 5 до 100 кВт окажется в 10–30 раз больше номинального. Такой ток недопустим прежде всего по условиям коммутации двигателя, так как при этом возникает недопустимо интенсивное искрение под щетками. Кроме того, при таком токе двигатель развивает слишком большой начальный пусковой момент, который может привести к недопустимым ускорениям и поломке механизмов. Пуск двигателя без пускового реостата при питании от сети относительно небольшой мощности сопровождается снижением напряжения сети, что ухудшает условия работы других потребителей.

Рассчитав соответствующим образом сопротивление пускового реостата, можно ограничить начальные пусковой ток и пусковой момент до требуемых значений. При увеличении частоты вращения якоря ЭДС возрастает, что приводит к уменьшению тока и момента. Это позволяет постепенно уменьшать сопротивление пускового реостата r в процессе пуска двигателя.

Полное сопротивление пускового реостата r разбивают на несколько ступеней (рис. 43а), число которых определяет число искусственных электромеханических и механических характеристик, на которых двигатель работает при пуске.

Уравнение искусственных электромеханических и механических характеристик (рис. 43):

$$n_a = \frac{U}{k_e \Phi} - \frac{I_a (r_a + r)}{k_e \Phi}, \quad n_m = \frac{U}{k_e \Phi} - \frac{M (r_a + r)}{k_e k_m \Phi^2}$$

Характер изменения магнитного потока при изменении нагрузки не зависит от сопротивления цепи якоря, вследствие чего искусственные характеристики двигателей имеют те же особенности, что и естественные. Исключением является лишь то, что большим добавочным сопротивлением реостата в цепи якоря соответствуют при том же токе I_a или моменте M меньшие частоты вращения и, следовательно, более «мягкие» характеристики. Все искусственные характеристики двигателя параллельного возбуждения (рис. 43б), а также смешанного возбуждения (рис. 43в) проходят через одни и те же точки холостого хода. У двигателя последовательного возбуждения независимо от значения добавочного сопротивления цепи якоря при $M = M_c \rightarrow 0$, $I_a \rightarrow 0$, $\Phi \rightarrow 0$, $n \rightarrow 0$ (рис. 43г).

От выбора значений моментов M_1 и M_2 зависят время пуска, число пусковых ступеней реостата и плавность пуска. Наименьшее значение момента M_2 должно быть больше M_c . С точки зрения нормальной работы двигателей наибольшее значение момента M_1 определяется условиями коммутации; очевидно, двигатель последовательного возбуждения может иметь большое значение момента M_1 .

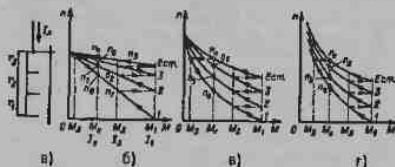


Рис. 43. Схема пускового реостата (а) и пусковые механические характеристики двигателей (б, в, г)

якорю $J_1 J_2$, от которого она и получает питание. Обмотку возбуждения рассчитывают в этом случае на то же напряжение, что и якорь генератора.

Магнитный поток Φ генератора смешанного возбуждения возбуждается расположенными на главных полюсах двумя обмотками: обмоткой параллельного возбуждения $Ш Ш$ и обмоткой последовательного возбуждения $С С$. Обмотки параллельного и последовательного возбуждения включают согласно, т. е. таким образом, чтобы их МДС совпадали по направлению.

Обмотки независимого и параллельного возбуждения существенно отличаются от обмотки последовательного возбуждения в конструктивном отношении. Обмотки независимого и параллельного возбуждения изготавливаются из провода относительно малого диаметра, имеют сравнительно большое число витков и сопротивление. В отличие от этого обмотка последовательного возбуждения изготавливается из провода относительно большого диаметра, имеет небольшое число витков и сопротивление. Например, у машин мощностью от 5 до 100 кВт на напряжении 220 В обмотки параллельного возбуждения имеют соответственно сопротивления порядка 300–500 Ом, тогда как обмотки последовательного возбуждения — порядка 0,01–0,001 Ом. Площадь поперечного сечения провода для изготовления последовательной обмотки выбирают такого диаметра, чтобы обмотка не перегревалась под действием тока приемника.

В цепи обмоток возбуждения имеется реостат r , служащий для изменения тока возбуждения I_a , что необходимо в конечном итоге для регулирования напряжения U на выводах генератора и приемника. Сопротивление нагрузки r следует рассматривать как некоторое эквивалентное сопротивление, заменяющее группу приемников, получающих питание от генератора.

В некоторых установках находят применение трех-обмоточные генераторы, имеющие обмотки независимого, параллельного и последовательного возбуждения. Они имеют особые свойства и характеристики.

таки создается магнитное поле, в результате чего в коммутлируемых секциях индуктируется ЭДС, компенсирующая ЭДС e_a , e_M и e . Так как ЭДС e_a , e_M и e зависят от тока якоря, то для их компенсации при различных нагрузках обмотку дополнительных полюсов включают последовательно с якорем. Вследствие насыщения дополнительных полюсов при перегрузках машины условия коммутации ухудшаются и под щетками появляется недопустимое искрение. Наибольший допустимый ток машин постоянного тока определяется условиями коммутации и лежит для различных машин в пределах $(2 \div 3) I_{ном}$, где $I_{ном}$ — номинальный ток машины.

Так как ЭДС e возникает вследствие вращения якоря в магнитном поле реакции якоря, то для ее уничтожения с помощью МДС дополнительных полюсов должно быть создано магнитное поле, от вращения в котором возникла бы ЭДС, направленная против e . Учитывая характер изменения результирующего магнитного поля при нагрузке генератора и двигателя с указанными направлениями их вращения, следует, что полярность дополнительного полюса генератора должна быть такой же, как последующего за ним по направлению вращения главного полюса; полярность дополнительного полюса двигателя должна быть такой же, как предшествующего ему по направлению вращения главного полюса. Выбирая соответствующее значение МДС обмотки дополнительных полюсов, можно скомпенсировать также ЭДС e_a и e_M .

43. ТОРМОЗНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ

Как известно, для сокращения времени торможения при остановке производственных машин и механизмов часто применяются механические тормоза. Сокращение времени торможения, особенно в случае непродолжительного цикла работы, приводит к существенному повышению производительности машин и механизмов. Недостатками механических тормозов являются быстрый износ трущихся поверхностей, сложность и необходимость периодического регулирования тормозящего усилия, необходимость дополнительного места для размещения тормоза и его соединения с механизмом.

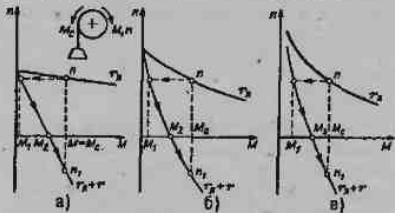


Рис. 44. Три тормозных режима работы электродвигателя

Все перечисленные недостатки устраняются, если для указанных целей вместо механического тормоза использовать свойства электродвигателей работать в тормозных режимах, т. е. работать по сути дела, в качестве генератора, и развивать не вращающий, а тормозной момент.

Во многих подъемно-транспортных машинах (кранах, лифтах, эскалаторах и т. д.), где возможно дви-

44. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И КПД МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Преобразование электрической энергии в механическую с помощью двигателей и механической в электрическую с помощью генераторов сопровождается потерями энергии, чему соответствуют определенные потери мощности. От значений потерь мощности зависит важнейший энергетический показатель машин постоянного тока — их КПД. Потери мощности в машинах приводят к их нагреванию.

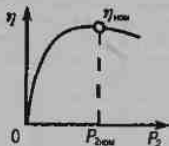


Рис. 45. Зависимость КПД машин постоянного тока от полезной мощности

В машинах постоянного тока различают следующие основные виды потерь мощности.

1. Потери мощности в сопротивлении цепи якоря: $\Delta P_a = I_a^2 R_a$. Как видно, потери мощности ΔP_a зависят от нагрузки машины. Поэтому их называют переменными потерями мощности.

2. Потери мощности в стали $\Delta P_{ст}$, вызванные главным образом вихревыми токами и намагничиванием магнитопровода якоря при его вращении. Частично эти потери возникают из-за вихревых токов в поверхностном слое полюсных наконечников, вызванных пульсацией магнитного потока при вращении якоря.

3. Механические потери мощности $\Delta P_{мех}$, причиной которых является трение в подшипниках, щетках о коллектор, вращающихся частей о воздух.

45. УСТРОЙСТВО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Асинхронный двигатель трехфазного тока представляет собой электрическую машину, служащую для преобразования электрической энергии трехфазного тока в механическую. Благодаря простоте устройства, высокой надежности в эксплуатации и меньшей стоимости по сравнению с другими двигателями асинхронные двигатели трехфазного тока нашли широкое применение в промышленности и сельском хозяйстве. С их помощью приводятся в движение металлорежущие и деревообрабатывающие станки, подъемные краны, лебедки, лифты, эскалаторы, насосы, вентиляторы и другие механизмы.

Двигатель имеет две основные части: неподвижную — статор и вращающуюся — ротор. Статор состоит из корпуса, представляющего собой основание всего двигателя. Он должен обладать достаточной механической прочностью и выполняется из стали, чугуна или алюминия. С помощью лап двигатель крепится к фундаменту или непосредственно к станине производственного механизма. Существуют и другие способы крепления двигателя к производственному механизму.

В корпус смонтирован сердечник статора, представляющий собой полый цилиндр, на внутренней поверхности которого имеются пазы с обмоткой статора. Часть обмотки, находящаяся вне пазов, называется лобовой; она отогнута к торцам сердечника статора. Так как в сердечнике статора действует переменный магнитный поток и на статор действует момент, развиваемый двигателем, сердечник должен изготавливаться из ферромагнитного материала достаточной механической прочности. Для уменьшения потерь от вихревых токов сердечник статора собирают из отдельных листов (толщиной 0,35–0,5 мм) электротехнической стали и каждый лист изолируют лаком или другим изоляционным материалом.

Обмотка статора выполняется в основном из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения, реже — из алюминиевого провода. В качестве изоляции проводов друг от друга

используют бумагу, хлопчатобумажную ткань, пропитанные различными лаками, слюду, стекловолокно и различные эмали. Для изоляции проводов обмотки от сердечника статора служат электроизоляционный картон, слюда, асбест, стекловолокно.

Для изоляции обмоток асинхронных двигателей низкого напряжения применяют лавсан с электроизоляционным картоном, для двигателей высокого напряжения — пленки на слюдяной основе.

Обмотка статора состоит из трех отдельных частей, называемых фазами. Фазы могут быть соединены между собой звездой или треугольником. Начала обмоток будем обозначать на схемах буквами А, В, С, концы — X, Y, Z. Обмотки двигателей малой и средней мощности изготавливают на напряжения 380/220 и 220/127 В. Напряжение, указанное в числителе, соответствует соединению обмоток звездой, в знаменателе — треугольником. Таким образом, один и тот же двигатель при соответствующей схеме соединения его обмоток может быть включен в сеть на любое указанное в паспорте напряжение. Существуют двигатели на 500, 660 и 1140 В.

Двигатели высокого напряжения изготавливают на напряжения 3000 и 6000 В.

Сердечник ротора представляет собой цилиндр, собранный, так же как и сердечник статора, из отдельных листов электротехнической стали, в котором имеются пазы с обмоткой ротора.

Обмотки ротора бывают двух видов — короткозамкнутые и фазные. Соответственно этому различают асинхронные двигатели с короткозамкнутым и фазным ротором (с контактными кольцами). Короткозамкнутая обмотка состоит из стержней, расположенных в пазах, и замыкающих колец. Стержни присоединены к замыкающим кольцам, в результате чего обмотка оказывается короткозамкнутой. Стержни и замыкающие кольца в одних двигателях изготавливают из меди, в других — из алюминия, в третьих — из бронзы и т. д. По внешнему виду короткозамкнутая обмотка напоминает беличье колесо, поэтому ее иногда называют «беличьей клеткой».

Фазную обмотку ротора выполняют так же, как и обмотку статора.

4. Потери мощности в цепи параллельной или независимой обмотки возбуждения: $\Delta P = U I = I^2 r_c$. Потери ΔP_c , $\Delta P_{\text{вост}}$, ΔP_r при изменении нагрузки машин меняются незначительно, вследствие чего их называют постоянными потерями мощности.

КПД машин постоянного тока:

$$\eta = P_2 / P_1,$$

где P_2 — полезная мощность машины (у генератора это электрическая мощность, отдаваемая приемнику, у двигателя — механическая мощность на валу); P_1 — подводимая к машине мощность (у генератора это механическая мощность, сообщаемая ему первичным двигателем, у двигателя — мощность, потребляемая им от источника постоянного тока; если генератор имеет независимое возбуждение, то P_1 включает в себя также мощность, необходимую для питания цепи обмотки возбуждения).

Мощность P_1 может быть выражена следующим образом:

$$P_1 + P_1 + \Delta P,$$

где ΔP — сумма перечисленных выше потерь мощности.

С учетом последнего выражения $\eta = P_2 / (P_1 + \Delta P)$. Когда машина работает холостую, полезная мощность P_2 равна нулю и $\eta = 0$. Характер изменения КПД при увеличении полезной мощности зависит от значения и характера изменения потерь мощности. График зависимости $\eta(P_2)$ приведен на рисунке 45.

При увеличении полезной мощности КПД сначала возрастает при некотором значении P_2 , достигает наибольшего значения, а затем уменьшается. Последнее объясняется значительным увеличением переменных потерь, пропорциональных квадрату тока. Машины рассчитывают обычно таким образом, чтобы наибольшее значение КПД находилось в области, близкой к номинальной мощности $P_{2\text{ном}}$. Номинальное значение КПД машин мощностью от 1 до 100 кВт лежит примерно в пределах от 0,74 до 0,92 соответственно.

жение под действием сил тяжести, с помощью тормозного момента электродвигателя обеспечивается постоянная, установившаяся скорость опускания грузов.

Электродвигатели постоянного тока могут работать в трех тормозных режимах:

- 1) в режиме противовключения;
- 2) в генераторном режиме с отдачей энергии в сеть;
- 3) в режиме динамического торможения.

В любом из тормозных режимов электродвигатель работает как генератор, преобразует, например, кинетическую энергию движущихся частей либо потенциальную энергию опускающегося груза в электрическую энергию.

Режим противовключения представляет собой режим, в котором якорь двигателя под действием внешнего момента либо запаса кинетической энергии вращается в направлении, противоположном тому, в котором он должен был бы вращаться при данной схеме его включения (рис. 44а) в двигательном режиме (или вхолостую).

Генераторным режимом с отдачей энергии в сеть называется режим, в котором двигатель под действием внешнего момента либо запаса кинетической энергии вращается с частотой, большей частоты вращения холостого хода ($n > n_0$), в том же направлении, в котором он должен был бы вращаться при данной схеме его включения (рис. 44б) в двигательном режиме (или вхолостую).

Режим динамического торможения возникает при отключении якоря двигателя от сети и замыкании его на резистор, называемый резистором динамического торможения (рис. 44в).

46. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В обмотке статора, включенной в сеть трехфазного тока, под действием напряжения возникает переменный ток, который создает вращающееся магнитное поле. Магнитное поле пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них переменную ЭДС, направление которой определяется по правилу правой руки и указано на рисунке 46 крестиками. Поскольку обмотка ротора замкнута, ЭДС вызывает в ней ток того же направления.

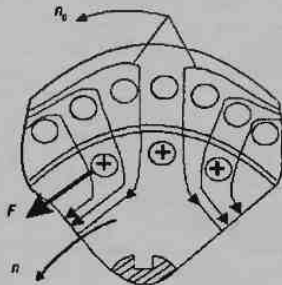


Рис. 46. Пояснение принципа действия асинхронного двигателя

В результате взаимодействия тока ротора с вращающимся магнитным полем (на основании закона Ампера) возникает сила, действующая на проводники ротора, направление которой определяется по

47. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Все проводники одной фазы обмотки статора двухполюсного асинхронного двигателя размещены в двух диаметрально противоположных пазах и в обмотке действует постоянный ток.

Для любой линии магнитной индукции по закону полного тока можно написать:

$$2H_0 I_0 + H_{ст} I_{ст} = \Sigma k_w,$$

где $H_0, H_{ст}$ — напряженности магнитного поля, соответственно, в воздушном зазоре (I_0) и в участках сердечников ротора и статора ($I_{ст}$);

k_w — МДС одной фазы обмотки.

V и H в различных участках сердечника статора и ротора неодинаковые, например в зубцах между пазами статора, а также ротора они имеют наибольшее значение, поскольку сечение магнитопровода в зубцах наименьшее.

Так как $H = B / \mu$, а $\mu_{ст} \gg \mu_0$, то $H_0 \gg H_{ст}$, и поэтому для упрощения анализа картины магнитного поля асинхронного двигателя можно полагать, что $2H_0 I_0 \approx \Sigma k_w$, откуда $H_0 = \Sigma k_w / 2I_0$, а магнитная индукция в воздушном зазоре $B_0 = \mu H_0$.

Поскольку воздушный зазор одинаков по всей длине, то напряженность и магнитная индукция вдоль всего зазора будут иметь, соответственно, одинаковые значения. Наилучшие показатели двигателя имеет, когда магнитная индукция в воздушном зазоре распределяется по синусоидальному закону. Для получения графика, близкого к синусоиде, проводники одной фазы обмотки укладывают в возможно большее число пазов и выполняют обмотку с укороченным шагом.

Проводники второй и третьей фаз обмотки создают аналогичные магнитные поля, но сдвинутые в пространстве на угол 120° . Если одну фазу обмотки подключить к сети однофазного тока, где напряжение изменяется во времени синусоидально, то магнитное поле будет изменяться во времени синусоидально с частотой тока сети. Таким образом, магнитное поле, созданное синусоидальным током

48. ЭДС, ЧАСТОТА ТОКА РОТОРА, СКОЛЬЖЕНИЕ

Частота тока статора пропорциональна частоте вращения магнитного поля, созданного током статора: $f_1 = n_0 p / 60$.

Так как ротор вращается в сторону поля (рис. 47), частота пересечения его обмотки магнитным полем будет определяться разностью частот вращения магнитного поля и ротора. Частота тока ротора: $f_2 = (n_0 - n) p / 60$.

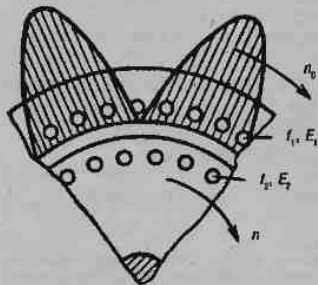


Рис. 47. Пояснение скольжения и частоты тока ротора

Из последних отношений $f_1 / f_2 = n / (n_0 - n)$ получаем выражение частоты тока ротора $f_2 (n_0 - n) / n_0 = f_1 s$, где s — скольжение: $s = (n_0 - n) / n_0$.

Скольжение — величина безразмерная, представляющая собой частоту вращения ротора отно-

сительно поля статора, выраженную в долях частоты вращения поля статора.

Когда ротор неподвижен, $n = 0$,

$$s = (n_0 - n) / n_0 = 1, f_2 = f_1 s = f_1 \times 1 = f_1.$$

Если ротор вращается с частотой поля, то

$$s = (n_0 - n) / n_0 = 0, f_2 = f_1 s = f_1 \times 0 = 0.$$

При неподвижном роторе его обмотка относительно поля находится в тех же условиях, что и обмотка статора. Поэтому ЭДС обмотки ротора может быть определена по аналогичной формуле, что и ЭДС обмотки статора:

$$E_{2k} = 4,44 f_1 \omega_2 \Phi k_{2k},$$

где ω_2 — число витков фазы обмотки ротора;

k_{2k} — обмоточный коэффициент обмотки ротора.

Когда ротор вращается:

$$E_2 = 4,44 f_2 \omega_2 \Phi k_{2k}.$$

Из двух последних отношений вытекает, что:

$$E_2 = E_{2k} = f_2 / f_1;$$

$$E_2 = E_{2k} = f_1 s / f_1 = E_{2k} s.$$

Таким образом, ЭДС обмотки ротора пропорциональна скольжению.

При $n = 0$, $s = 1$, $E_2 = E_{2k}$;

при $n = n_0$, $s = 0$, $E_2 = 0$.

одной фазы, распределяется вдоль воздушного зазора примерно синусоидально, неподвижно в пространстве и изменяется во времени.

Обмотка статора асинхронного двигателя соединяется звездой или треугольником и подключается к сети трехфазного тока. Поскольку каждая фаза обмотки имеет одинаковое число витков и они симметрично расположены по окружности статора, их сопротивление и амплитуда тока будут одинаковыми, но токи в фазах обмотки будут сдвинуты во времени относительно друг друга на 120° . Токи каждой фазы обмотки создадут магнитные поля, которые будут сдвинуты во времени на тот же угол. В результате сложения магнитных полей всех фаз образуется общее магнитное поле двигателя. Магнитная индукция результирующего магнитного поля оказывается распределенной вдоль воздушного зазора также по синусоиде, ее амплитуда не изменяется во времени и в 1,5 раза больше амплитуды магнитной индукции одной фазы. Результирующее магнитное поле вращается с постоянной частотой.

Для доказательства образования вращающегося магнитного поля воспользуемся графоаналитическим методом, с помощью которого построим картину магнитного поля для нескольких моментов времени периода переменного тока.

Сравнивая картины магнитных полей и векторные диаграммы, убедимся, что за время $T / 3$ результирующее магнитное поле двухполюсного асинхронного двигателя повернется в пространстве на 120° , оставаясь неизменным по амплитуде. За время одного периода поле повернется на $360^\circ (2\pi)$, т. е. сделает один оборот.

Угловая скорость поля равна $\omega_0 = 2\pi / T$.

Частота вращения магнитных полей всех двухполюсных асинхронных двигателей, включенных в промышленную сеть, составляет $n_0 60 \times 50 = 3000$ об/мин.

Двигатели выполняются не только с двумя, но и с четырьмя, шестью, восьмью и более полюсами; в общем случае они имеют p пар полюсов. Обмотка каждой фазы статора таких двигателей состоит из нескольких частей, которые соединяются между собой параллельно или последовательно.

правилу левой руки. Сила создает момент, действующий в ту же сторону.

Под действием момента ротор приходит в движение и после разбега вращается в том же направлении, что и магнитное поле, с несколько меньшей частотой вращения, чем поле:

$$n = (0,92 \pm 0,98) n_0.$$

Все сказанное о принципе действия асинхронного двигателя справедливо, если обмотка ротора выполнена из ферромагнитного материала с теми же магнитными свойствами, что и сердечник ротора. Обмотка ротора выполняется из неферромагнитного материала (меди или алюминия), поэтому магнитная индукция в лагу с проводниками намного меньше, чем в зубцах. Основная сила, вызывающая момент вращения, возникает в результате взаимодействия магнитного поля ротора с вращающимся магнитным полем статора и приложена к зубцам ротора. На проводник действует только небольшая сила. Для анализа работы двигателя и получения расчетных уравнений обычно считают, что в основе принципа действия асинхронного двигателя лежит закон Ампера — взаимодействие проводника с током и магнитного поля.

Такая трактовка закономерна, поскольку результаты расчета при этом совпадают с полученными из принципа взаимодействия магнитных полей ротора и статора.

49. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МОЩНОСТЬ И ПОТЕРИ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ

Мощность, потребляемая двигателем из сети, определяется по формуле:

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

Часть этой мощности (рис. 48) теряется в обмотке статора: $\Delta P_{обст} = 3I_1^2 r_1$, а часть $\Delta P_{ст1}$ составляет потери в сердечнике статора от перемагничивания и вихревых токов.

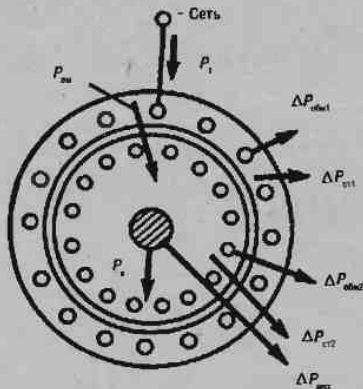


Рис. 48. Потери мощности в асинхронном двигателе

50. МОМЕНТ, РАЗВИВАЕМЫЙ ДВИГАТЕЛЕМ

Известно, что мощность равна произведению момента на частоту вращения: $P = M\omega$.

В асинхронном двигателе произведение электромагнитного момента, возникающего в результате взаимодействия тока ротора с магнитным полем, на частоту вращения поля представляет собой **электромагнитную мощность**:

$$M_{эм} \omega_0 = P_{эм}$$

Механическая мощность, развиваемая двигателем, равна произведению электромагнитного момента на частоту вращения ротора:

$$M_{эм} \omega = P_{мех}$$

Если пренебречь потерями мощности в сердечнике ротора вследствие их малости относительно потерь в обмотке ротора, то разность электромагнитной и механической мощностей будет равна потерям мощности в обмотке ротора:

$$P_{эм} - P_{мех} = \Delta P_{обмд} = 3I_2^2 r_2.$$

Получим:

$$M_{эм} \omega_0 - M_{эм} \omega = 3I_2^2 r_2,$$

откуда:

$$M_{эм} = \frac{3I_2^2 r_2}{\omega_0 - \omega}.$$

Заменяв $\omega_0 - \omega$ через $\omega_0 s$, получим выражения электромагнитного момента:

$$M_{эм} = \frac{3I_2^2 r_2}{\omega_0 s}.$$

51. МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Механической характеристикой называется зависимость частоты вращения ротора двигателя или скольжения от момента, развиваемого двигателем при установившемся режиме работы: $n = f(M)$ или $s = f(M)$.

Механическая характеристика является одной из важнейших характеристик двигателя. При выборе двигателя к производственному механизму из множества двигателей выбирают тот, механическая характеристика которого удовлетворяет требованиям механизма.

Располагая параметрами двигателя, можно рассчитать и построить его механическую характеристику, которая будет иметь вид, изображенный на рисунке 49.

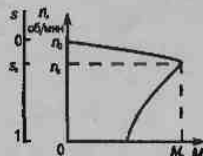


Рис. 49. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Необходимо отметить, что после включения двигателя в нем происходят сложные переходные электромагнитные процессы. В тех случаях, когда время разбега оказывается соизмеримым с временем электромагнитных процессов, механическая характеристика двигателя в период разбега может существенно отличаться от статической.

Одной из важных точек характеристики является точка, где момент, развиваемый двигателем, достигает наибольшего значения. Эта точка имеет координаты $n_{кр}, s_{кр}, M_{max}$.

Момент, развиваемый двигателем, при любом скольжении пропорционален квадрату напряжения. Максимальный момент пропорционален квадрату напряжения и не зависит от сопротивления цепи ротора. Критическое скольжение пропорционально сопротивлению цепи ротора и не зависит от напряжения сети.

На практике обычно пользуются уравнением механической характеристики, с помощью которого можно произвести необходимые расчеты и построения, используя только каталожные данные.

Упрощенное уравнение механической характеристики:

$$M = \frac{2M_{max}}{s/s_k + s_k/s}$$

Значение M_{max} определяется из отношения $M_{max}/M_{ном} = \lambda$, указываемого в каталогах.

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

где $s_{ном} = (n_0 - n) / n_0$, $\lambda = M_{max} / M_{ном}$.

Следует отметить, что в зоне от $M = 0$ до $M = 0,9M_{max}$ механическая характеристика близка к прямой линии. Поэтому при расчетах пусковых и регулировочных резисторов эту часть механической характеристики принимают за прямую линию, проходящую через точки $M = 0$, $n = n_0$ и $M_{ном}, n_{ном}$. Уравнение механической характеристики в этой части будет иметь вид:

$$M = \frac{M_{ном}}{s_{ном}} s.$$

и электромагнитной мощности:

$$P_{эм} = \frac{3I_2^2 r_2}{s}.$$

Момент, развиваемый двигателем на валу, будет меньше электромагнитного момента на величину $\Delta M_{мех}$, обусловленную силами трения в подшипниках, ротора о воздух и вентиляционными потерями: $M = M_{эм} - \Delta M_{мех}$.

Потери момента $\Delta M_{мех}$ для асинхронных двигателей средней и большой мощности относительно малы. В практических расчетах часто принимают, что:

$$M = M_{эм}.$$

$$\text{Тогда } M_{эм} = \frac{3I_2^2 \cos \psi_2}{\omega_0 s}.$$

Потери в обмотке ротора $-\Delta P_{обм2} = P_{эм} s$.

Механическая мощность, развиваемая под двигателем, составляет:

$$P_{мех} = P_{эм} (1 - s).$$

Из этих выражений вытекает, что при неподвижном роторе, когда $s = 1$, вся электромагнитная мощность преобразуется в теплоту в обмотке ротора, а механическая мощность равна нулю.

При номинальном режиме работы, когда $s \approx 0,02 \div 0,08$, почти вся электромагнитная мощность (0,92–0,98) преобразуется в механическую и только небольшая ее часть (0,02–0,08) преобразуется в теплоту в обмотке ротора.

Мощность, передаваемая вращающимся магнитным полем ротору, называется **электромагнитной мощностью** и составляет:

$$P_{эм} = P_1 - \Delta P_{отм1} - \Delta P_{сст1} = 3E_{2k2} I_2 \cos \psi_1.$$

Часть электромагнитной мощности теряется в обмотке ротора: $\Delta P_{обм2} = 3I_2^2 r_2$, а часть $\Delta P_{сст2}$ составляет потери в сердечнике ротора от гистерезиса и перемагничивания.

Мощность, преобразуемая в механическую, равна:

$$P_{мех} = P_{эм} - \Delta P_{обм2} - \Delta P_{сст2}.$$

Небольшая часть механической мощности теряет на трение в подшипниках ротора о воздух и вентиляцию.

Мощность, развиваемая двигателем на валу:

$$P_2 = P_{мех} - \Delta P_{мех}.$$

Все потери мощности, кроме вентиляционных, которые представляют собой затраты мощности на продувание воздуха внутри двигателя с целью лучшего охлаждения, превращаются в теплоту и нагревают двигатель.

52. ПАСПОРТНЫЕ ДАННЫЕ ДВИГАТЕЛЯ. РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Расчет и построение механической характеристики производят по каталожным данным двигателя.

В каталоге приводятся следующие данные: тип двигателя, $P_{ном}$, $U_{ном}$, $I_{ном}$, $n_{ном}$, $\eta_{ном}$, $\cos \varphi_{ном}$, $M_{пуск} / M_{ном} = \lambda$.

Для двигателя с короткозамкнутым ротором дополнительно даются отношение пускового момента к номинальному ($M_p / M_{ном}$) и отношение пускового тока к номинальному ($I_p / I_{ном}$); для двигателя с фазным ротором — напряжение между кольцами при неподвижном и разомкнутом роторе $U_{2к} = E_{2к}$ и номинальный ток ротора $I_{2ном}$. Буквенные и цифровые обозначения типа двигателя позволяют судить о его назначении, габаритной мощности, числе пар полюсов и т. д. Поскольку существует большое число типов двигателей и в каталогах даны пояснения, что означает каждая буква и цифра, останавливаться на этом в книге нет необходимости.

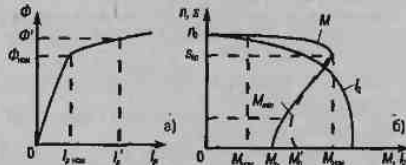


Рис. 50. График зависимости потока двигателя от намагничивающего тока (а); механическая характеристика двигателя с учетом пускового момента $M_{п}$, заданного в каталоге (б)

Номинальной мощностью $P_{ном}$ двигателя общего назначения длительного режима работы называется мощность, которую двигатель может длительно развивать на валу, нагреваясь при этом до допустимой

53. ПУСК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Для пуска двигателя его обмотку статора подключают к трехфазной сети с помощью выключателя. После включения выключателя происходит разгон двигателя. Двигатель разгоняется до установившейся частоты вращения, при которой момент, развиваемый двигателем, равен моменту сил сопротивления на его валу.

В условиях нормальной работы момент на валу двигателя может изменяться в довольно широких пределах, но, если момент окажется больше $M_{ном}$, двигатель остановится. Допустимые изменения находятся в пределах от $M = 0$ до $M = (0,8 \div 0,9) M_{ном}$, имеется в виду работа в зоне характеристики, где $s > s_{кр}$.

Большой ток в периоды пуска двигателя может вызвать значительное падение напряжения в сети малой мощности, что неблагоприятно скажется на работе других потребителей, включенных в сеть.

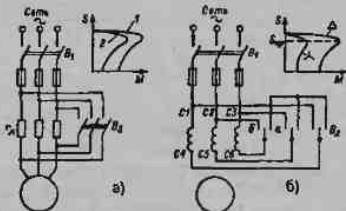


Рис. 51. Схема асинхронных двигателей

Большой пусковой ток ограничивает допустимое число пусков двигателя в час. При большом числе включений даже малозагруженный в установившемся режиме двигатель из-за больших пусковых токов может перегреться и выйти из строя.

54. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Важными в энергетическом отношении характеристиками двигателя являются зависимость КПД η и коэффициента мощности $\cos \varphi$ от нагрузки его на валу. КПД двигателя равен отношению мощности P_B , отдаваемой двигателем с вала, к мощности P_1 , потребляемой двигателем из сети:

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

где ΔP — потери мощности в двигателе.

$$\Delta P = \Delta P_{отм1} + \Delta P_{отм2} + \Delta P_{с1} + \Delta P_{с2} + \Delta P_{мех}$$

Потери мощности в двигателе можно разделить на две части: часть $\Delta P = \Delta P_{с1} + \Delta P_{с2} + \Delta P_{мех}$ почти не зависит от нагрузки и называется постоянными потерями, другая часть $\Delta P = \Delta P_{отм1} + \Delta P_{отм2}$ зависит от нагрузки и называется переменными потерями.

Зависимость КПД от нагрузки изображена на рисунке 52, где нагрузка дана в относительных единицах.

Как видно из графика, КПД в зоне нагрузок от 0,4 до 1,2 изменяется относительно мало, что является благоприятным в энергетическом отношении.

Коэффициент мощности двигателя равен отношению активной мощности, потребляемой двигателем из сети, к полной мощности:

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

Реактивная мощность Q складывается из мощности Q_0 , обусловленной главным магнитным по-

током, и мощности Q , обусловленной потоками рассеяния:

$$Q_0 = I_0^2 x_0, \quad Q_p = I_1^2 x_1 + I_2^2 x_2,$$

где x_0 — индуктивное сопротивление, обусловленное главным магнитным потоком;

x_1, x_2 — индуктивные сопротивления, обусловленные потоками рассеяния обмоток статора и ротора.

Поскольку главный магнитный поток намного больше потоков рассеяния и почти не зависит от нагрузки, реактивная мощность, потребляемая двигателем из сети, мало зависит от нагрузки, $\cos \varphi$ существенно изменяется при изменении нагрузки. На рисунке 52 изображен график зависимости $\cos \varphi$ от нагрузки на валу двигателя. Из графика видно, что при малых нагрузках $\cos \varphi$ довольно низкий, что является в энергетическом отношении весьма невыгодным.

У двигателей средней мощности (1–100 кВт) при номинальной нагрузке КПД составляет:

$$\eta_{\text{ном}} = 0,7 - 0,9, \quad \cos \varphi_{\text{ном}} = 0,7 - 0,9;$$

у двигателей большой мощности (больше 100 кВт) КПД равен:

$$\eta_{\text{ном}} = 0,9 \div 0,94, \quad \cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8 \div 0,92.$$

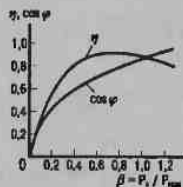


Рис. 52. Зависимость η , $\cos \varphi$ от нагрузки асинхронного двигателя

В маломощных сетях, сечение проводов которых невелико, а протяженность значительна, для ограничения пускового тока применяют пуск с активным или индуктивным сопротивлением, включенным в цепь обмотки статора (рис. 51а), или пуск с переключением обмотки со звезды на треугольник. Перед пуском выключатель B_2 (рис. 51а) устанавливают в выключенное положение, затем включают выключатель B_1 .

После окончания разбега ротора двигателя включают выключатель B_2 , чем шунтируют добавочные пусковые резисторы. Соответствующим подбором сопротивления r можно ограничить пусковой ток до любого необходимого значения. Но одновременно уменьшаются пусковой и критический моменты из-за снижения напряжения на обмотке статора, вызванного падением напряжения на сопротивлении r .

На рисунке 51б изображены механические характеристики двигателя при $r = 0$ (кривая 1) и $r \neq 0$ (кривая 2).

Пуск двигателя с переключением со звезды на треугольниквозможен, когда обмотка статора может быть соединена звездой и треугольником и напряжение сети соответствует соединению обмотки статора треугольником. Установив предварительно выключатель B_2 в положение а, что соответствует соединению обмотки статора звездой, выключателем B включают двигатель в сеть. После окончания пуска выключатель B_1 переключают в положение б, благодаря чему обмотка статора оказывается соединенной треугольником. Вследствие этого ток фазы уменьшится в той же степени, а поскольку линейный ток больше фазного в $\sqrt{3}$ раз, пусковой линейный ток при таком способе пуска будет меньше по сравнению с прямым пуском в 3 раза. Одновременно в 3 раза уменьшатся пусковой и максимальный моменты, так как они пропорциональны квадрату фазного напряжения.

Значение критического скольжения не изменится, так как оно не зависит от напряжения.

Из-за значительного снижения пускового момента указанный способ пуска возможен только при малых моментах сил сопротивления на валу двигателя.

температуры, обусловленной классом изоляции его обмоток. В двигателе возникают потери мощности, которые нагревают его. Когда двигатель имеет температуру окружающей среды, большая часть мощности потерь расходуется на повышение его температуры, а меньшая рассеивается в окружающую среду. С повышением температуры двигателя большая часть мощности потерь рассеивается в окружающую среду. По прошествии определенного времени наступает тепловое равновесие: вся мощность потерь, выделяющихся в двигателе, рассеивается в окружающую среду, и температура двигателя при заданной нагрузке остается неизменной. Повышение температуры двигателя выше допустимой вызывает ухудшение механической и электрической прочности изоляции. При этом изменяется структура изоляции и в конце концов она пробивается и двигатель выходит из строя. Можно ли нагружать двигатель мощностью больше номинальной? Можно кратковременно, если до этого двигатель работал с недогрузкой и его температура была ниже допустимой. Длительность и степень перегрузки в совокупности должны быть такими, чтобы в результате температура двигателя не превышала допустимую.

Мощность, потребляемая двигателем из сети, при номинальной и любой другой нагрузке может быть определена по формуле:

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

Отношение $M / M_{\text{ном}}$ характеризует перегрузочную способность двигателя.

Расчет механической характеристики двигателя обычно производят с помощью упрощенного уравнения механической характеристики, в котором M к s — координаты механической характеристики двигателя, M_{max} и $s_{\text{кр}}$ — его параметры.

Значение $M_{\text{ном}}$ определяют по формуле:

$$M_{\text{ном}} = \lambda M_{\text{ном}} = \lambda \frac{975 P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} [\text{кгс} \times \text{м}] = \lambda \frac{9550 P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} [\text{Н} \times \text{м}].$$

55. АСИНХРОННЫЙ ТАХОГЕНЕРАТОР

Тахогенератор — электрическая машина, преобразующая частоту вращения в электрический сигнал. Зависимость напряжения на выходе тахогенератора от частоты вращения называется **выходной характеристикой**. В идеальном случае эта зависимость прямая. Тахогенераторы используются для измерения частоты вращения, выработки ускоряющих и замедляющих сигналов, для операции дифференцирования.

Тахогенератор устроен так же, как однофазный асинхронный двигатель с полым немагнитным ротором. В пазах статора уложены две сдвинутые в пространстве на 90° обмотки: возбуждения OB (1) и выходная генераторная OG (2). Схема включения тахогенератора изображена на рисунке 53.

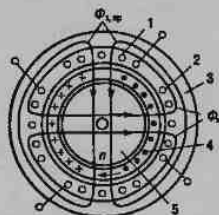


Рис. 53. Асинхронный тахогенератор:

- 1 — обмотка возбуждения;
- 2 — генераторная обмотка;
- 3 — сердечник статора;
- 4 — полый немагнитный ротор;
- 5 — внутренний сердечник статора

56. ВРАЩАЮЩИЙСЯ ТРАНСФОРМАТОР

Вращающийся (поворотный) трансформатор — электрическая машина. Он по устройству подобен асинхронному двигателю с контактными кольцами, предназначен для преобразования угла поворота его ротора в напряжение, пропорциональное некоторой функции этого угла. Вращающиеся трансформаторы подразделяются на **синусные**, напряжение на выходе которых пропорционально синусу или косинусу угла поворота ротора; **линейные**, где напряжение на выходе пропорционально углу поворота, и на **трансформаторы-построители**, напряжение которых пропорционально корню квадратному из суммы квадратов напряжений на входах:

$$U_{\max} = C \sqrt{U_{1\text{вх}}^2 + U_{2\text{вх}}^2}$$

Для получения указанных выше зависимостей выходного напряжения от угла поворота может быть использована одна и та же машина с двумя обмотками на статоре и двумя на роторе при соответствующих схемах их включения. Вращающиеся трансформаторы применяются в системах автоматического управления, в устройствах вычислительной техники для решения геометрических и тригонометрических задач и т. д.

В пазах сердечника статора (рис. 55) уложены две сдвинутые на 90° обмотки B и K , в пазах ротора также уложены две сдвинутые на 90° обмотки C и S . Концы обмоток ротора соединены так, как изображено на рисунке 55, и имеют три вывода, которые припаяны к трем контактными кольцам, установленным на оси ротора.

Рассмотрим синусно-косинусный режим работы вращающегося трансформатора: в этом случае на обмотку возбуждения B подается переменное напряжение $U_{\text{вх}}$. Напряжение вызывает ток в обмотке, а последний — переменный магнитный поток Φ_r , пронизывающий об-

57. ПОНЯТИЕ О ЛИНЕЙНОМ ТРЕХФАЗНОМ АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ

Для линейных перемещений элементов производственных механизмов находят применение линейные двигатели, в том числе и линейные трехфазные асинхронные двигатели. Принцип действия линейных трехфазных двигателей основан на явлении возникновения бегущего магнитного поля, создаваемого током неподвижной трехфазной обмотки. В трехфазном двигателе с вращающимся ротором магнитное поле Φ вращается с постоянной частотой вращения n_0 , в линейном трехфазном двигателе магнитное поле Φ (рис. 56б) перемещается с постоянной скоростью v_0 .

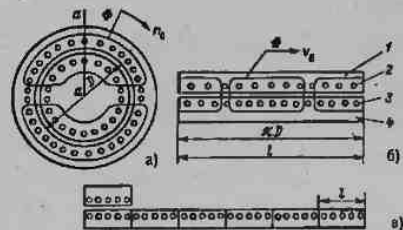


Рис. 56. Трехфазный асинхронный двигатель (а), элемент линейного трехфазного двигателя (б), линейный трехфазный двигатель (в)

Устройство одного элемента линейного асинхронного трехфазного двигателя можно наглядно представить, если мысленно разрезать двигатель с вращающимся ротором плоскостью aa , проходящей через ось вращения (рис. 56а), и развернуть его на горизонтальную плоскость (рис. 56б). В линейном двигателе (рис. 56б): 4 — неподжный сердечник статора, 3 — обмотка статора, 2 — короткозамкнутая обмотка ротора, 1 — сердечник ротора.

Скорость перемещающего магнитного поля, м/мин, равна:

$$v_0 = \pi D n_0 = l \times 60f / p,$$

где l — длина элемента линейного двигателя.

В зависимости от требуемого пути перемещения подвижного ротора статор линейного двигателя (рис. 56в) составляется из пристыкованных один к другому нескольких элементарных двигателей, изображенных на рисунке 56б, ротор имеет длину одного элементарного двигателя.

Ротор двигателя перемещается по направляющим так, что воздушный зазор между статором и ротором сохраняется неизменным.

мотки ротора C и S . Продольные составляющие потоков обмоток C и S , обуславливающие ЭДС, возникающую в них, как это следует из векторной диаграммы рисунка 55, соответственно равны:

$$\Phi_{ms} = \Phi_m \cos \alpha, \quad \Phi_{mc} = \Phi_m \sin \alpha.$$

Если для обмотки возбуждения справедливо выражение:

$$U_{\text{вв}} = E_{\text{вв}} = 4,44\omega_s f \Phi_m,$$

то для обмоток C и S справедливо:

$$U_s = E_s = 4,44\omega_s f \Phi_m \cos \alpha = E_{ms} \cos \alpha,$$

$$U_c = E_c = 4,44\omega_s f \Phi_m \sin \alpha = E_{mc} \sin \alpha.$$

Все это справедливо при холостом ходе, когда к обмоткам C и S не подключены потребители и ток в обмотках равен нулю. В действительности нагрузка существует, в обмотках действует ток, который создает магнитный поток, существенно искажающий закон изменения выходных напряжений. Компенсация этих изменений осуществляется с помощью компенсационной обмотки, которая замыкается в одних случаях коротко, в других — на какое-то сопротивление.

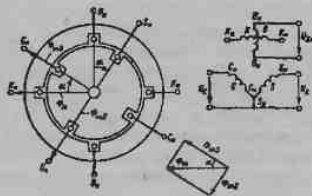


Рис. 55. Пояснение устройства и принципа действия поворотного трансформатора

Ток обмотки возбуждения, включенной в сеть переменного тока с напряжением U_s , создает неподвижный в пространстве пульсирующий с частотой сети магнитный поток Φ . Этот поток пронизывает тело полого немагнитного ротора и генераторную обмотку. При неподвижном полюсе ротора ЭДС в генераторной обмотке не возникает в силу того, что магнитный поток расположен перпендикулярно этой обмотке. Ток, возникающий в полюсе ротора, создает магнитный поток, направленный против потока возбуждения, уменьшает его значение, но не изменяет его положения. Это происходит потому, что из-за большого немагнитного зазора (двух воздушных промежутков и стенки немагнитного ротора) индуктивное сопротивление полого ротора невелико, поэтому ток в полюсе ротора совпадает по фазе с ЭДС.

Когда полый ротор вращается, в результате пересечения им магнитного потока возбуждения Φ в нем возникает ЭДС вращения, направление ее для какого-то момента времени указано на рисунке 53 точками и крестиками. ЭДС вращения вызывает ток в полюсе ротора, а последний создает магнитный поток $\Phi_{r, \text{об}}$, который, как это указано на рисунке 54, совпадает с осью генераторной обмотки. В результате в генераторной обмотке от этого потока возникает ЭДС, пропорциональная окружной скорости, т. е. частоте вращения ($e = Blv$), ток, пропорциональный ЭДС, и магнитный поток, пропорциональный току (магнитная система не насыщена). Таким образом, ЭДС, возникающая в генераторной обмотке, пропорциональна частоте вращения полого ротора тахогенератора.

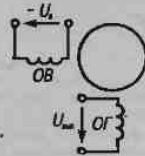


Рис. 54. Схема включения асинхронного тахогенератора

58. НАЗНАЧЕНИЕ И УСТРОЙСТВО СИНХРОННЫХ МАШИН

Синхронные машины используются в качестве генераторов, двигателей и синхронных компенсаторов. Устанавливаемые на тепловых электростанциях генераторы приводятся во вращение паровыми турбинами и называются **турбогенераторами**. Синхронные генераторы гидроэлектростанций вращаются с помощью гидротурбин и носят название **гидрогенераторов**. Кроме электростанций, синхронные генераторы находят применение в установках, требующих автономного источника электроэнергии. Примерами могут служить автомобильные электрические приборы, на которых синхронные генераторы приводятся во вращение двигателями внутреннего сгорания.

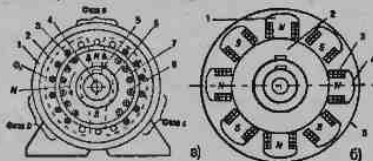


Рис. 57. Устройство синхронной машины: а) с неявно выраженными полюсами; б) ротора машины с явно выраженными полюсами

Трехфазные синхронные генераторы, двигатели и синхронные компенсаторы имеют в принципе одинаковое устройство.

Неподвижная часть машины, называемая **статором** (рис. 57а), состоит из стального или чугунного корпуса 1, в котором закреплен цилиндрический сердечник 2 статора. Для уменьшения потерь на перемагничивание и вихревые токи его набирают из листов электротехнической стали. В пазах сердечника статора уложена трехфазная обмотка 3, выполняемая так же, как и обмотка статора асинхронных двигателей. Сердечник статора в совокупности с обмоткой статора называется **якорем** машины. В подшипниковых щитах, при-

59. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРА

Если обмотку возбуждения генератора подключить к источнику постоянного тока, то МДС обмотки будет создано основное магнитное поле, характеризующееся магнитным потоком Φ_r

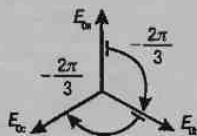


Рис. 58. Векторная диаграмма ЭДС машины

Так как катушки фаз обмотки якоря имеют одинаковые числа витков и смещены в пространстве относительно друг друга на 120° , то при вращении магнитного поля в трех фазах будут индуцироваться три ЭДС, одинаковые по амплитуде и частоте, сдвинутые по фазе друг относительно друга также на угол 120° . Чтобы при постоянной частоте вращения ЭДС изменялись по закону, близкому к синусоидальному, магнитная индукция вдоль воздушного зазора, разделяющего магнитопроводы статора и ротора, должна быть распределена также примерно по синусоидальному закону. В машинах с явно выраженными полюсами это достигается за счет неодинакового воздушного зазора между сердечником статора и полюсными наконечниками, в машинах с неявно выраженными полюсами — за счет соответствующего распределения обмотки возбуждения по пазам сердечника статора.

Векторная диаграмма ЭДС генератора дана на рисунке 58. Действующее значение и частота синусоидальной ЭДС, индуцируемой в фазе обмотки якоря, могут быть определены, как и в асинхронном двигателе, по формулам:

$$E_0 = 4,44k\omega I\Phi_r, \quad f = pn / 60.$$

Для получения стандартной частоты 50 Гц при различных частотах вращения синхронные генераторы

60. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЯ

При работе синхронной машины в качестве двигателя обмотка якоря подключается к источнику трехфазного тока, в результате возникает вращающийся магнитный поток Φ_a . После разгона ротора до частоты вращения n , близкой к частоте вращения n_0 поля якоря, его обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока и возникает магнитный поток Φ_r . Благодаря взаимодействию магнитного потока Φ_a и проводников обмотки ротора (или полюсов намагниченных сердечников якоря и ротора) возникает вращающийся электромагнитный момент $M_{эм}$, действующий на ротор, и он втягивается в синхронизм, т. е. начинает вращаться с частотой вращения, равной частоте вращения n_0 магнитного поля якоря.

Положение оси mm' магнитного поля ротора относительно оси kk' поля якоря и значение момента $M_{эм}$ зависят от нагрузки двигателя.

Так, при работе двигателя в режиме идеального холостого хода электромагнитный момент $M_{эм}$ равен нулю. Некоторой механической нагрузкой двигателя соответствует положение ротора, которому соответствует определенный вращающийся момент $M_{эм}$.

Значение тока якоря, интенсивность и характер действия реакции якоря зависят при $M_{эм} = \text{const}$ от значения ЭДС E_0 , которая определяется значением тока возбуждения. Когда двигатель потребляет от источника только индуктивную или активно-индуктивную мощность, под действием поля якоря двигатель намагничивается; в случае потребления емкостной или активно-емкостной мощности двигатель под действием поля якоря размагничивается.

Как и у других машин, у асинхронных машин электромагнитный момент незначительно отличается от момента, развиваемого машиной на валу. Поэтому для простоты анализа будем считать их в дальнейшем равными и обозначать M .

Существенной особенностью синхронного двигателя (в отличие от асинхронного) является то, что вращающий момент возникает у него в том случае, когда частота вращения ротора n равна частоте вращения n_c магнитного поля якоря.

Объясняется это тем, что ток в обмотке возбуждения синхронного двигателя появляется не в результате электромагнитной индукции (как в обмотке ротора асинхронного двигателя), а вследствие питания обмотки возбуждения от постороннего источника постоянного тока.

Частота вращения магнитного поля якоря, а значит, и ротора синхронного двигателя определяется по формуле $n_c = n = 60f/p$.

Для получения различных частот вращения синхронные двигатели изготовляют с различными числами полюсов. При частоте $f = 50$ Гц частоты вращения будут 3000, 1500, 1000, 750 об/мин и т. д.

Изготавливаются с разными числами пар полюсов. Так, турбогенераторы изготавливаются в большинстве случаев на частоту вращения 3000 об/мин и имеют одну пару полюсов ($p = 1$). Изготовление турбогенераторов на наименьшее число пар полюсов и, соответственно, на наибольшую частоту вращения позволяет уменьшить габаритные размеры, массу и стоимость генераторов. Частота вращения гидрогенераторов определяется в основном высотой напора воды и для различных станций лежит в пределах от 50 до 750 об/мин, что соответствует числам пар полюсов от 60 до 4.

Если к обмотке якоря подключить приемник электрической энергии, то под действием ЭДС в фазах обмотки якоря и приемника появятся токи; генератор начнет отдавать приемнику электрическую энергию.

При работе генератора с нагрузкой МДС трехфазной обмотки якоря возбуждается вращающееся магнитное поле якоря, характеризуемое магнитным потоком Φ_a , частота вращения которого равна частоте вращения ротора, т. е. $n_a = n = 60f/p$; взаимное расположение осей магнитных полей якоря и ротора при данной нагрузке генератора остается неизменным.

Под действием поля якоря результирующее поле генератора при изменении его нагрузки будет также изменяться, что оказывает влияние в конечном итоге на значение напряжения генератора. Воздействие поля якоря на результирующее поле машины называется **реакцией якоря**.

В результате взаимодействия магнитного потока Φ и проводников обмотки возбуждения (или полюсов намагниченных сердечников якоря и ротора) на ротор действует электромагнитный момент, направленный у генератора против направления частоты вращения ротора и являющийся тормозящим.

Значение электромагнитного момента, интенсивность и характер действия реакции якоря зависят, кроме значения тока якоря, от характера сопротивления приемника. Объясняется это тем, что при изменении характера сопротивлений приемников изменяется взаимное расположение осей магнитных потоков Φ_a и Φ_r .

крепленных с торцевых сторон к корпусу, либо в стояках, закрепленных на фундаменте, расположены подшипники, несущие вал 4 вращающейся части машины — ротора или индуктора. Синхронные генераторы гидроэлектростанций выполняют обычно с вертикальным расположением вала. На валу размещен цилиндрический сердечник 7 ротора, выполняемый из сплошной стали. В пазах сердечника ротора уложена обмотка возбуждения 8, питаемая постоянным током. Для присоединения обмотки возбуждения к внешней электрической цепи на валу укрепляют два изолированных друг от друга и от вала контактных кольца 6, к которым пружинами прижимаются неподвижные щетки 5. Обмотка 8 служит для возбуждения основного магнитного поля машины.

Питание обмотки возбуждения осуществляется от генератора постоянного тока (возбудителя), вал которого соединен с валом синхронной машины, от полупроводникового преобразователя переменного тока в постоянный либо от других источников постоянного тока. Мощность для питания обмотки возбуждения составляет 1–3% мощности машины.

На рисунке 57а показан разрез двухполюсной синхронной машины с явно выраженными полюсами ротора. Такие машины изготавливают на частоты вращения 3000, 1500 и 1000 об/мин. Машины, предназначенные для работы с меньшими частотами вращения (750, 600, 500 об/мин и т. д.), имеют явно выраженные полюсы, число которых тем больше, чем меньше частота вращения. На рисунке 57б показано устройство ротора восьмиполюсной машины с явно выраженными полюсами. Ротор вписан в окружность 5, представляющую собой условно внутреннюю окружность сердечника статора. Выраженные полюсы 1 изготавливают из стальных листов (реже — массивных) и закрепляют на обode 2 ротора. Обод ротора в совокупности с явно выраженными полюсами представляет собой сердечник ротора. Отдельные катушки обмотки возбуждения 3, расположенные на явно выраженных полюсах, соединены между собой так, что северные и южные полюсы чередуются. Трехфазная обмотка якоря синхронных машин выполняется так, что возбуждаемое ею вращающееся магнитное поле имеет такое же число полюсов, как и ротор.

61. СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Схема включения синхронного генератора приведена на рисунке 59. Трехфазная обмотка якоря генератора *ОЯ* подключается к приемникам электрической энергии, которые в зависимости от их номинального напряжения и напряжения генератора могут быть соединены как звездой, так и треугольником. Под сопротивлением z_n, r_n и x_n (рис. 59) следует понимать эквивалентные сопротивления группы приемников, получающих питание от генератора.

В цепь обмотки возбуждения *ОВ* генератора, питаемой постоянным током, включен реостат r_p , служащий для регулирования тока возбуждения $I_{вн}$, а в конечном итоге — напряжения U на выводах обмотки якоря генератора.

45

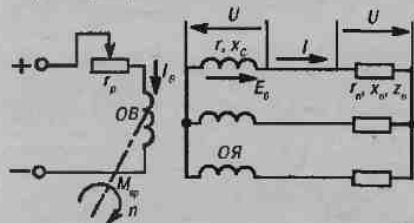


Рис. 59. Простейшая схема включения синхронного генератора

Для упрощения дальнейшего изложения условимся считать, что эквивалентной ЭДС $E_{ст}$ соответствует некоторый вращающийся магнитный поток якоря $\Phi_{ст}$, эквивалентный в отношении создаваемой им ЭДС потокам Φ и $\Phi_{вн}$.

Для любой из фаз обмотки якоря (см. рис. 59) можно написать: $\vec{E}_0 = I(r + j\dot{x}_c + \vec{U})$.

62. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Построение векторной диаграммы можно начать с вектора ЭДС \vec{E}_0 (рис. 60а). Зная, что к генератору подключена, например, активно-индуктивная нагрузка, под углом ψ к вектору ЭДС \vec{E}_0 откладываем вектор тока \vec{I} . Под углом φ к вектору тока \vec{I} следует провести линию *ОА*, на которой в дальнейшем будет расположен вектор напряжения генератора \vec{U} . Так как ток \vec{I} должен отставать по фазе на 90° от индуктивного падения напряжения $j\dot{x}_c I$, то из конца вектора ЭДС E_0 следует опустить перпендикуляр *БВ* на вектор тока. Точка *Г* определит конец и начало векторов напряжения \vec{U} и падения напряжения $j\dot{x}_c I$. Сумма векторов напряжения \vec{U} и падения напряжения $j\dot{x}_c I$ должна быть равна вектору ЭДС E_0 .

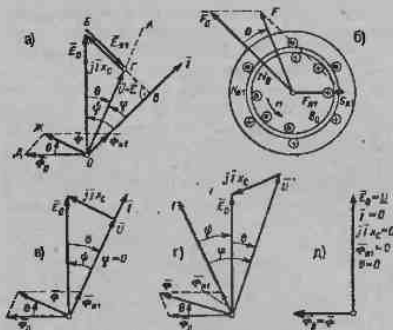


Рис. 60. Векторные диаграммы синхронного генератора

63. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Для оценки свойств синхронных генераторов используют те же характеристики, что и для генераторов постоянного тока. Только условия, при которых определяются внешняя и регулировочная характеристики, несколько дополняются.

Характеристика холостого хода. Основной магнитный поток синхронного генератора является функцией тока возбуждения, т. е. $\Phi_0(I_{вн})$:

$$E_0 = 4,44k\omega \frac{p}{60} \Phi_0(I_{вн}).$$

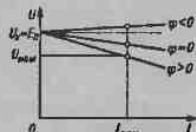


Рис. 61. Внешние характеристики синхронного генератора

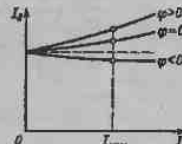


Рис. 62. Регулировочные характеристики синхронного генератора

Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения $U(I)$ определяется при следующих условиях: $p = \text{const}$ и $I_{вн} = \text{const}$. Так как напряжение синхронного генератора зависит при прочих равных условиях еще и от характера нагрузки, то дополни-

тельным условием, при котором следует определять внешнюю характеристику синхронного генератора, должно быть постоянство коэффициента мощности, т. е. $\cos \varphi = \text{const}$.

Внешние характеристики синхронного генератора при активной ($\varphi = 0$), активно-индуктивной ($\varphi > 0$) и активно-емкостной ($\varphi < 0$) нагрузках приведены на рисунке 61.

Относительное изменение напряжения генератора оценивают по формуле:

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{U_x - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \times 100 = \frac{\Delta U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \times 100,$$

где U — напряжение генератора при холостом ходе ($I = 0$), равно ЭДС;

$U_{\text{ном}}$ — напряжение при номинальной нагрузке ($I = I_{\text{ном}}$).
В случае наиболее часто встречающейся активно-индуктивной нагрузки при $\cos \varphi = 0,8$ относительное изменение напряжения $\Delta U_{\text{ном}}$ у некоторых генераторов доходит до 35–45 %.

Поскольку напряжение синхронного генератора изменяется при изменении нагрузки в значительных пределах, необходимо принимать меры для уменьшения изменения напряжения. Этого можно добиться за счет соответствующего изменения ЭДС генератора E_0 путем воздействия на его ток возбуждения $I_{\text{в}}$. О том, как и в каких пределах необходимо изменять ток возбуждения при изменении тока нагрузки генератора, чтобы поддерживать $U = \text{const}$, и дают представление регулировочные характеристики (рис. 62).

Дополнительным условием, при котором должна определяться каждая из характеристик (кроме $p = \text{const}$), является $\cos \varphi = \text{const}$.

Для нормальных условий работы приемников электрической энергии необходимо поддерживать напряжение и частоту синхронного генератора на заданных уровнях. Для этого синхронные генераторы снабжаются в большинстве случаев регуляторами, управляющими напряжением и частотой вращения генераторов и воздействующими на ток возбуждения генераторов и момент первичного двигателя.

Учитывая, что постоянные по значению вращающиеся магнитные потоки могут быть заменены эквивалентными пульсирующими потоками, изменяющимися во времени по синусоидальному закону, на векторной диаграмме (рис. 60а) можно изобразить векторы потоков Φ_0 и $\Phi_{\text{я}}$, а также вектор результирующего потока Φ , сцепленного с обмоткой якоря:

$$\vec{U} = \vec{E}_0 + j\vec{I}x_c = \vec{E}_0 + \vec{E}_{\text{я}}$$

ЭДС E_0 и $E_{\text{я}}$, индуцируемые потоками Φ_0 и $\Phi_{\text{я}}$, можно заменить эквивалентной ЭДС якоря E , индуцируемой результирующим потоком Φ , $\vec{U} = \vec{E} - \vec{I}x_{\text{я}}$.

Так как ЭДС пропорциональны соответствующим магнитным потокам, то вместо последнего выражения можно написать:

$$\vec{\Phi} = \vec{\Phi}_0 + \vec{\Phi}_{\text{я}}$$

На рисунке 60а произведено построение вектора результирующего потока Φ . Как видно, все ЭДС отстает от соответствующих потоков на 90° . Магнитный поток $\Phi_{\text{я}}$ совпадает по фазе с возбуждающим его током I .

Из подобия треугольников *ОБГ* и *ОДЖ* (рис. 60а) вытекает, что ЭДС E_0 сдвинута по фазе относительно напряжения \vec{U} на такой же угол θ , на какой магнитный поток $\vec{\Phi}_0$ сдвинут по фазе относительно потока $\vec{\Phi}$. Тот же угол θ при данной нагрузке генератора существует и между пространственными векторами МДС \vec{F}_0 и \vec{F} (рис. 60б), а значит, и между осями магнитных потоков $\vec{\Phi}_0$ и $\vec{\Phi}$ генератора.

Рассмотренная диаграмма (рис. 60а) соответствует активно-индуктивной нагрузке. На рисунках 60в и 60г приведены диаграммы, построенные для тех же ЭДС E_0 и тока I , что и на рисунке 60а, но для активной и активно-емкостной нагрузок. Диаграмма, изображенная на рисунке 60д, соответствует работе генератора вхолостую.

Обычно сопротивление r значительно меньше x_c . Поэтому при качественном анализе явлений в синхронных машинах сопротивление r можно не учитывать. Тогда $\vec{E}_0 = j\vec{I}x_c + \vec{U}$.

Напряжение на выводах генератора и приемника может быть выражено в соответствии с законом Ома:

$$\vec{U} = \vec{I}z_n = \vec{I}r_n + j\vec{I}x_n;$$

$$\vec{E}_0 = j\vec{I}x_c + \vec{I}r_n + j\vec{I}x_n;$$

$$\vec{I} = \frac{\vec{E}_0}{r_n + j(x_c + x_n)}, \quad \vec{U} = \vec{E}_0 - j\vec{I}x_c.$$

Углы сдвига фаз между током и напряжением φ , током и ЭДС ψ определяются по формулам:

$$\varphi = \arcsin \frac{x_n}{z_n}, \quad \psi = \arcsin \frac{x_c + x_n}{z_n}.$$

Зная ЭДС, напряжение, ток и углы сдвига фаз, нетрудно найти мощность генератора. Например, электромагнитную мощность $P_{\text{эм}}$, вырабатываемую генератором, и активную мощность $P_{\text{а}}$, отдаваемую им приемнику, найдем по формулам:

$$P_{\text{эм}} = 3E_0 I \cos \psi; \quad P_{\text{а}} = 3UI \cos \varphi.$$

Мощность $P_{\text{эм}}$ отличается от мощности $P_{\text{а}}$ на значение потерь мощности в активном сопротивлении обмотки якоря:

$$P_{\text{эм}} = P_{\text{а}} + \Delta P_{\text{я}} = 3UI \cos \varphi + 3I^2 r_n.$$

Из формул следует, что ток, напряжение, углы сдвига фаз и мощности зависят при заданных значениях E_0 и x_c исключительно от значений и характера сопротивлений приемника. Напряжение U на выводах генератора отличается от ЭДС E_0 за счет падения напряжения в сопротивлении x_c .

64. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Параллельные работы генераторов. Одиночно работающие синхронные генераторы встречаются сравнительно редко. Они используются в электрифицированных передвижных установках, на небольших сельских электростанциях и в ряде других случаев. На крупных электростанциях устанавливают несколько генераторов, включаемых параллельно и работающим на общую нагрузку. Это дает возможность увеличить мощность электростанции, повысить надежность электроснабжения потребителей и экономичность электростанции. При уменьшении общей нагрузки станции часть генераторов и первичных двигателей может быть остановлена, вследствие чего оставшиеся будут работать с большей нагрузкой и более высоким КПД. С целью повышения надежности электроснабжения и экономичности несколько электростанций соединяют между собой в энергетическую систему.

Включение генераторов на параллельную работу является весьма серьезной и ответственной задачей, так как при неправильном включении могут возникнуть недопустимо большие токи, представляющие опасность как для самих генераторов, так и для других элементов электрооборудования. Чтобы не возникло недопустимо больших токов при включении генераторов на параллельную работу, должны быть выполнены следующие требования: порядок чередования фаз генераторов должен быть одним и тем же; генераторы должны иметь одинаковые (или близкие по значениям) частоты и напряжения, напряжения генераторов в момент включения должны совпадать (или почти совпадать) по фазе.

Если генератор включен на параллельную работу с уже работающими генераторами, то при точном выполнении указанных требований он будет работать вхолостую. Чтобы перевести на вновь включенный генератор часть активной мощности, отдаваемой электростанцией или энергетической системой потребителям, увеличивают вращающий момент, прикладываемый к валу генератора со стороны первичного

65. УГЛОВАЯ И МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Для синхронного двигателя можно написать такие же по виду выражения мощностей, как и для синхронного генератора, но применительно к двигателю они будут иметь иные значения.

У двигателя $P = 3UI \cos \varphi$ представляет собой мощность, потребляемую им из трехфазной сети. Вычитая из этой мощности потери мощности в обмотке якоря, получаем электромагнитную мощность, т. е. мощность, преобразуемую из электрической в механическую, развиваемую вращающимся ротором:

$$P_{\text{эм}} = P - \Delta P_s = 3UI \cos \varphi + 3I^2 r = 3E_0 I \cos \psi.$$

Электромагнитный момент синхронного двигателя может быть выражен через мощность $P_{\text{эм}}$ и угловую скорость $\omega = \pi n / 30$ ротора: $M = P_{\text{эм}} / \omega$.

Заменяя мощность $P_{\text{эм}}$ ее выражением, получим:

$$M = \frac{3E_0 I \cos \varphi}{\omega}, \quad I \cos \psi = \frac{U \sin \theta}{x_c},$$

$$M = \frac{3E_0 U}{\omega x_c} \sin \theta.$$

При постоянных значениях U , E , ω и x_c момент двигателя прямо пропорционален $\sin \theta$. Зависимость $M(\theta)$ называется угловой характеристикой синхронного двигателя и приведена на рисунке 64 в первом квадранте. Максимальный момент, который в состоянии развивать двигатель, наступает при $\theta = 90^\circ$:

$$M_{\text{max}} = \frac{3UE_0}{\omega x_c}.$$

Если момент сопротивления M_c окажется больше момента M_{max} , то двигатель будет не в состоянии его уравновесить и остановится. Отношение $M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}$ называется перегрузочной способностью двигателя и для различных двигателей лежит в пределах 2—3,2.

66. ПУСК СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Предположим, что обмотка якоря синхронного двигателя подключена к сети трехфазного тока, обмотка возбуждения — к источнику постоянного тока, а ротор неподвижен. МДС обмотки якоря будет создано вращающееся магнитное поле, благодаря взаимодействию которого с проводниками ротора на последний будет действовать момент. Направление момента зависит от положения вращающегося поля относительно ротора и при вращении поля будет изменяться. На рисунке 67 показано, где вращающееся поле якоря заменено вращающимся кольцевым магнитом, а ротор — постоянным магнитом. Независимо от числа полюсов синхронного двигателя при частоте сети 50 Гц направление момента, действующего на неподвижный ротор, изменяется 100 раз в секунду. Вследствие большой частоты изменения направления момента и значительной инерционности ротора последний не сможет прийти во вращение (см. рис. 66).

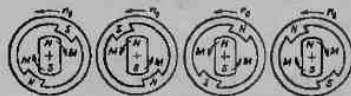


Рис. 66. Пояснение пуска синхронного двигателя

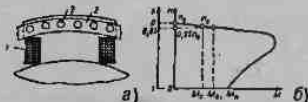


Рис. 67. Пусковая обмотка синхронного двигателя: а) с явно выраженными полюсами; б) его механическая характеристика

Если предварительно разогнать ротор до частоты вращения n , близкой к частоте вращения n_0 поля якоря, а затем подключить обмотку возбуждения к источнику постоянного тока, то под действием момента двигателя частота вращения ротора возрастет и наступит равенство: $n = n_0$. Ротор будет вращаться далее синхронно с полем якоря.

Для разгона синхронного двигателя используют так называемый асинхронный пуск синхронного двигателя. С этой целью ротор снабжают, кроме обмотки возбуждения 1 (рис. 67а) пусковой обмоткой, которая состоит из стержней 2, уложенных в пазы полюсных наконечников и замыкаемых с торцевых сторон коротко сегментами 3. Пусковая обмотка подобна короткозамкнутой обмотке ротора асинхронного двигателя.

Поскольку синхронный двигатель пускается как асинхронный, он имеет в период пуска свойства асинхронного двигателя. Чтобы можно было произвести пуск двигателя, должно быть выполнено соотношение $M_n > M_c$. Но для пуска синхронного двигателя этого оказывается недостаточно. Двигатель надежно входит в синхронизм, если подключение обмотки возбуждения к источнику постоянного тока происходит при скольжении $s \leq 0,05$ (частота вращения $n \geq 0,95n_0$). Момент двигателя M_{max} , соответствующий $s = 0,05$, называется входным. Чтобы двигатель мог разогнаться до скольжения $s \leq 0,05$, должно быть выполнено условие $M_{вх} > M_c$.

Соотношения между пусковым, входным и номинальным моментами лежат для различных двигателей в следующих пределах:

$$M_n / M_{ном} = 0,7 - 2,9; \quad M_{вх} / M_{ном} = 0,6 - 2,3$$

При необходимости ограничения пускового тока или пускового момента синхронного двигателя можно использовать те же способы, что в случае пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Рассмотрим явления, происходящие при изменении нагрузки двигателя. Допустим, что двигатель работает с моментом $M = M_1$ и углом θ (см. рис. 64). В результате изменения момента сопротивления, например от M_1 до $M_2 > M_1$, происходит кратковременное снижение частоты вращения ротора, что сопровождается соответствующим изменением частоты индуцированной ЭДС E_0 и, следовательно, частоты вращения вектора ЭДС E_0 на векторной диаграмме. В результате этого возрастает угол сдвига фаз θ ЭДС E_0 относительно напряжения U и, как следствие, увеличиваются ток I , падение напряжения ΔU , момент M и мощности P и $P_{мех}$.

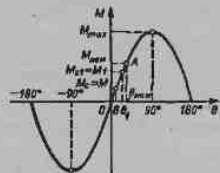


Рис. 64. Угловая характеристика синхронного двигателя



Рис. 65. Механическая характеристика синхронного двигателя

Так как при изменении нагрузки двигателя происходит лишь сравнительно небольшое смещение ротора относительно вращающегося поля, то механическая характеристика синхронного двигателя представляется линией, параллельной оси абсцисс (рис. 65). Двигатель имеет постоянную частоту вращения при изменении момента вплоть до максимального значения.

двигателя. Для загрузки генератора реактивной мощностью изменяют ток возбуждения генератора.

Векторные диаграммы синхронного генератора. На рисунке 63а изображена векторная диаграмма синхронного двигателя при некоторых значениях механической нагрузки и тока возбуждения $I_{в}$. Последнему соответствуют определенные значения магнитного потока Φ_0 и ЭДС E_0 .

Диаграмму можно построить в следующем порядке. В некотором масштабе откладываем вектор напряжения U и под углом φ к нему — вектор тока I . Так как двигатель работает под нагрузкой, то потребляемая им мощность P будет положительной, если угол φ лежит в пределах $(-\pi/2; +\pi/2)$. Значение угла φ при данной нагрузке двигателя зависит от значения ЭДС E_0 .

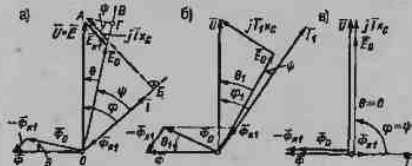


Рис. 63. Векторные диаграммы синхронного двигателя

Поскольку падение напряжения ΔU должно опережать по фазе ток I на 90° , из конца вектора напряжения U следует опустить перпендикуляр AB на вектор тока I . На линии AB должны быть расположены вектор падения напряжения ΔU и конец вектора ЭДС E_0 . Сумма векторов ЭДС E_0 и падения напряжения ΔU должна быть равна вектору напряжения U .

Как и в случае синхронного генератора, магнитные потоки двигателя Φ_0 , Φ_1 и Φ пропорциональны ЭДС E_0 , E_1 и $E = U$. Но в отличие от генератора вектор результирующего магнитного потока двигателя должен определяться соотношениями $\Phi = \Phi_0 - \Phi_1$; $E = U = E_0 + \Delta U = E_0 + E_1$.

67. АППАРАТУРА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И ПРОСТЕЙШИЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Схема дистанционного управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором изображена на рисунке 68.

49

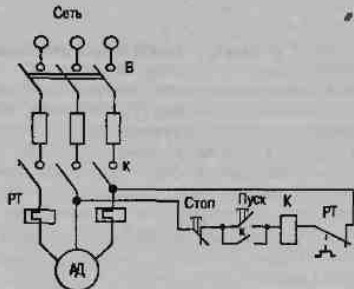


Рис. 68. Схема дистанционного управления асинхронным двигателем с короткозамкнутой обмоткой ротора

Защита силовых цепей и двигателя от коротких замыканий осуществляется плавкими предохранителями P , защита двигателя от перегрева, вызванного перегрузками или другими причинами, — тепловым реле PT . Включение и отключение двигателя производят электромагнитным аппаратом — контактором K . Для пуска и остановки использованы две кнопки: «пуск» и «стоп». Выключатель B служит для снятия напряжения с установки после окончания рабочего дня или при ремонте.

68. БЕСКОНТАКТНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Релейно-контакторные системы управления, несмотря на их широкое распространение, обладают существенными недостатками, обусловленными в первую очередь тем, что аппараты управления имеют движущиеся части и подвижные замыкающие и размыкающие контакты. Контакты и подвижные части быстро изнашиваются, что приводит к нарушению соединения между контактами и выходу из строя некоторых аппаратов и всей схемы управления. Особенно сильно недостатки релейно-контакторных систем проявляются при автоматизации сложных технологических процессов (поточных линий и т. п.), где используются сотни, а иногда и тысячи контакторов, реле, путевых выключателей и др. Вероятность нарушения контактов становится весьма существенной, а работа системы — ненадежной.

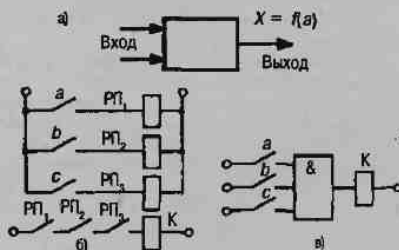


Рис. 69. Ремонтно-контактные системы:
а) определение логического элемента;
б) логический элемент;
в) его релейный эквивалент

69. ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ. ДЕЙСТВИЕ УПРАВЛЯЮЩЕЙ СЕТКИ

Для регулирования величины анодного тока между анодом и катодом устанавливают еще один электрод, называемый управляющей сеткой. Конструктивно сетка представляет собой проволочную спираль или решетку с рядом параллельных прутков.

Лампа, содержащая три электрода, называется трехэлектродной лампой, или триодом.

При подаче на управляющую сетку отрицательного потенциала по отношению к катоду между сеткой и катодом появляется поле, тормозящее электроны. Это поле, накладываясь на ускоряющее поле анода, ослабляет последнее.

Электроны, успевшие приобрести во время полета от катода до сетки большую кинетическую энергию, пролетают через отверстие сетки и попадают на анод. Часть же электронов (более медленных) возвращается к катоду под действием тормозящего поля сетки. Вследствие этого сетка уменьшает анодный ток. При большом отрицательном потенциале сетки величина анодного тока может быть доведена до нуля.

Если к сетке подвести положительный потенциал относительно катода, то поле сетки на участке «катод — сетка» будет усиливать анодное поле и увеличивать анодный ток.

Когда сетка имеет положительный потенциал, на нее падает часть электронов, которая создает сеточный ток. Положительное направление этого тока внутри лампы — от сетки к катоду, а вне лампы — от катода к источнику сеточного напряжения и сетке.

Сеточный ток может протекать и при небольших отрицательных потенциалах сетки относительно катода. Он создается падающими на сетку электронами.

ми, обладающими достаточными для этого начальными скоростями.

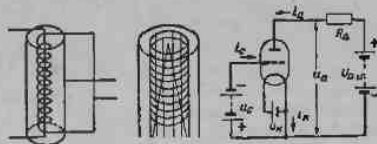


Рис. 70. Схема включения триода

Цепь сеточного тока i_c показана на рисунке 70. Ток катодной цепи i_k в триоде может отличаться от анодного тока:

$$i_c = i_a + i_k.$$

Если хорошо изолированную сетку зарядить положительно и отключить от источника сетевого напряжения, то с течением времени положительные заряды будут нейтрализованы электронами, падающими на сетку. Затем электроны, обладающие значительными скоростями, падая на сетку, будут увеличивать ее отрицательный заряд. Анодный ток при этом будет уменьшаться, пока лампа почти полностью не запрется.

Источник сетевого напряжения нужен для поддержания заданного сетевого напряжения; кроме того, он обеспечивает возможность возврата электронов, попавших на сетку, к катоду через внешнюю цепь.

В последнее время появились и быстро внедряются бесконтактные аппараты, называемые логическими элементами. Логические элементы не имеют движущихся частей, подвижных контактов и обладают значительным сроком службы. Системы автоматического управления с логическими элементами надежнее, чем релейно-контакторные системы.

Логический элемент представляет собой устройство (рис. 69а), имеющее один или несколько входов и один выход. Логические элементы выполняются на полупроводниковых приборах.

С помощью логических элементов можно осуществлять большое число разнообразных логических операций. Например, у логических элементов, выполняющих логическую функцию **ИЛИ**, при подаче сигнала на любой из входов появляется сигнал на выходе.

У логических элементов, выполняющих логическую функцию **И**, сигнал на выходе появляется лишь в том случае, если поданы сигналы на все входы. У логического элемента **НЕ (НЕТ)** сигнал на выходе исчезает при появлении сигнала на входе.

В качестве примера рассмотрим схему включения контактора **К** двигателя посредством электромагнитных реле и логического элемента **И**. Обмотка контактора **К** в релейном варианте (рис. 69б) получает питание в том случае, если замкнуты все контакты реле $РП_1, РП_2, РП_3$. Обмотки этих реле получают питание, если будут замкнуты входные контакты a, b, c . При использовании логического элемента **И** (рис. 69в) обмотка контактора **К** получает питание, если будут замкнуты контакты a, b, c на выходе логического элемента.

Рассмотрим устройство и принцип действия аппаратов управления, использованные в данной схеме.

Контактор — силовой электротехнический аппарат, посредством которого осуществляются включение и отключение силовых цепей: двигателей, электрических печей и других устройств.

Вместо контактора используются автоматы или бесконтактные системы включения на тиристорах.

Бывают контакторы переменного и постоянного тока. Электромагнитная система контактора состоит из катушки, неподвижного сердечника и якоря, укрепленного на валике. После включения катушки в сеть магнитный поток, созданный переменным током катушки, притягивает якорь и поворачивает валик, на котором укреплены силовые подвижные контакты. В результате происходит замыкание силовых подвижных и неподвижных контактов. Кроме силовых контактов, контактор имеет вспомогательные замыкающие и размыкающие контакты. Эти контакты замыкаются и размыкаются пластинами, укрепленными на траверсах, которые в свою очередь укреплены на валике.

Для уменьшения потерь в сердечнике на вихревые токи сердечник и якорь собраны из отдельных листов электротехнической стали.

70. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЛАМПЫ

В ряде случаев, связанных с геофизической разведкой, встречается необходимость измерения постоянных или медленно меняющихся токов малых величин, достигающих до 10^{-14} – 10^{-16} А, например, при измерении тока ионизационных камер, характеризующего интенсивность радиоактивных излучений при радиометрической разведке.

Первая лампа используемого при этом усилителя должна обладать большим входным сопротивлением и малым сеточным током. Анализ работы усилителя показывает, что точная цель лампы не будет вносить существенных искажений в результаты измерения, если ее сеточный ток не превышает 10^{-13} – 10^{-15} А. У обычных электронных ламп сеточный ток при отрицательном сеточном напряжении составляет 10^{-7} – 10^{-9} А. Поэтому обычные лампы не удовлетворяют требованиям электрометрических схем и приходится применять специальные лампы с меньшими сеточными токами, называемые электрометрическими.

Появление сеточных токов при отрицательном сеточном напряжении вызывается:

- 1) проводимостью междуподэлектродной изоляции, через которую проходит ток утечки;
- 2) тепловой эмиссией и фотоземиссией электронов с управляющей сетки;
- 3) попаданием на отрицательную сетку положительных ионов, возмещающих в результате ионизации электронами атомов оставшегося в баллоне газа, и в результате распыления катода;
- 4) падением на сетку электронов из потока электронов, идущего к аноду.

Положительными составляющими сеточного тока считают те, направление которых соответствует движению электронов внутри лампы к сетке от других электродов. Первые три составляющие, образующие отрицательный ток, складываются, а из их суммы вычитается последняя положительная составляющая сеточного тока. При работе с достаточно большими отрицательными напряжениями сетки с этой составляющей тока I можно не считаться.

71. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ

Электронно-лучевые трубки широко применяются в осциллографах, телевизионных приемниках, радиолокационной аппаратуре и других электронных устройствах. В геофизической практике используются главным образом трубки, предназначенные для работы в осциллографах, при помощи которых наблюдаются кривые изменений электрических величин. В запаянном и откачанном стеклянном баллоне 1 такой трубки (рис. 72а) помещены электроды. С катода 2 эмиттируется поток электронов, который под действием электрического поля фокусируется в узкий пучок, падающий на флуоресцирующий экран 9, где появляется светящееся пятно.

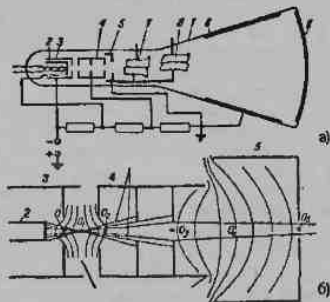


Рис. 72. Электронно-лучевая трубка:
а) схема устройства;
б) схема электронного прожектора

72. ФОТОЭЛЕМЕНТЫ С ВНЕШНИМ ФОТОЭФФЕКТОМ

При освещении металлов или полупроводников электронам этих веществ сообщается энергия, которая может быть достаточной для их выхода из вещества или для освобождения от межатомных связей. Такое действие лучистой энергии называют фотозффектом. Приборы, в которых используется фотозффект, называют фотозэлементами.

Существует три вида фотозэлементов:

- 1) с внешним фотозффектом, в которых электроны под действием света выходят из металла;
- 2) с внутренним фотозффектом (фотосопротивления), в которых освободившиеся от межатомных связей электроны не уходят за пределы вещества, а повышают его электропроводность (эти фотозэлементы меняют свое сопротивление в зависимости от освещенности);
- 3) с вентильным фотозффектом, у которых электроны переходят из слоя освещенного вещества в другой слой, отделенный от первого тонким запирающим слоем, обладающим большим электрическим сопротивлением, и тем самым создают разность потенциалов.

В геофизической аппаратуре находят применение фотозэлементы с внешним фотозффектом. Такой фотозэлемент (рис. 73а) представляет собой стеклянный эвакуированный или заполненный инертным газом баллон 3, в котором размещены металлический анод 1 и фотокатод 2. Под действием лучистой энергии, падающей на катод, последний эмиттирует электроны.

Фотокатод выполняется из металла, наносимого на подкладку, напыленную на стекло баллона. Поэтому светочувствительная поверхность фотокатода обращена внутрь баллона. Применяются главным образом кислородно-цезиевые и сурьмяно-цезиевые тоды. При включении фотозэлемента в цепь внешнего источника напряжения (положительный потенциал подается на анод) в этой цепи проходит ток, величина

на которого зависит от частоты и интенсивности излучения, действующего на фотокатод. На сопротивлении (рис. 73б), включенном в цепь фотозлемента, получается пропорциональное току напряжение, которое обычно усиливается.

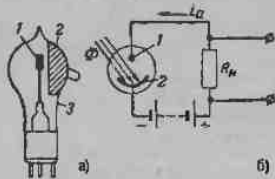


Рис. 73. Фотозлемент с внешним фотоэффектом: а) схема устройства; б) схема включения

Величина тока эмиссии, определяемого количеством эмиттируемых катодом электронов в единицу времени, прямо пропорциональна лучистому потоку Φ , падающему на катод:

$$I_0 = k\Phi,$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Максимальная энергия электронов, выходящих из фотокатода, возрастает пропорционально частоте ν излучения и не зависит от величины лучистого потока:

$$h\nu = e\varphi_0 + \frac{m_0 v^2}{2},$$

где $h\nu$ — произведение постоянной Планка на частоту излучения, равное энергии кванта света; $e\varphi_0$ — энергия выхода электрона из катода;

$\frac{m_0 v^2}{2}$ — кинетическая энергия, которой обладает электрон в момент выхода из катода.

На пути к экрану электронный поток проходит между двумя парами отклоняющих пластин: 7 и 8. Изменяя напряжения на этих пластинах, можно менять направление движения электронов и местоположение светящегося пятна на экране трубки. В электронно-лучевых трубках используются большей частью оксидные катоды с косвенным накалом. Применение таких катодов дает возможность получить большую плотность тока эмиссии, что важно для получения пятна достаточной яркости. Катод помещают внутри управляющего цилиндрического электрода 3, называемого модулятором и имеющего отрицательный потенциал относительно катода (порядка нескольких десятков вольт). Первый анод 4 выполняется в виде цилиндра с несколькими диафрагмами, имеющими соосные с трубкой отверстия. На этот анод подается положительный потенциал относительно катода (несколько сотен вольт). Под действием ускоряющего поля первого анода электроны, вышедшие из модулятора, движутся к первому аноду в виде расходящегося пучка.

На второй анод 5 подается больший положительный потенциал, чем на первый (порядка 1–6 кВ). На участках между модулятором 3 и анодом 4, а также между анодами 4 и 5 электроны стремятся двигаться в электростатическом поле вдоль его силовых линий, т. е. перпендикулярно эквипотенциальным поверхностям (рис. 72б).

На участках пути электронов, где эти поверхности обращены выпуклостями навстречу пучку электронов (участки $O-O_1$ и O_2-O_3) последние отклоняются к осевой линии. На участках O_1-O_2 и O_4-O_5 , где эквипотенциальные поверхности обращены к пучку вогнутостью, электроны отклоняются от осевой линии. Такое распределение электрических полей называют электронными линзами. Система, состоящая из электродов 3, 4, 5, создающая узкий пучок электронов, называется электронным прожектором.

Конструкции и режимы питания электрометрических ламп выбираются такими, при которых достигается уменьшение сеточного тока. Снижение токов утечки достигается креплением сетки внутри лампы на специальных изоляторах с развитой поверхностью, тщательной очисткой баллона и покрытием его веществами, уменьшающими утечку по стеклу. Термосвечную эмиссию с сетки уничтожают почти полностью, применяя катоды, работающие при низкой температуре.

Фотоэмиссия за счет света, падающего в баллон лампы, исключается путем тщательного затемнения лампы при работе. Электрометрические лампы рассчитываются для работы при анодных напряжениях 5–10 В. Такие напряжения определяют практически отсутствие ионизации молекул остаточного газа, что сводит к нулю ионный ток. При столь малых анодных напряжениях одновременно уменьшается и ток утечки в цепи «анод — сетка».

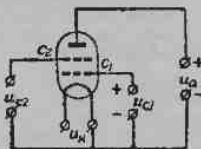


Рис. 71. Схема включения электрометрического тетрода

Для улучшения параметров электрометрических ламп, работающих при малых анодных напряжениях, эти лампы снабжаются дополнительным электродом. Этот электрод устанавливается между катодом и управляющей сеткой и носит название катодной сетки (рис. 71). Последняя получает положительный потенциал относительно катода и частично компенсирует отрицательный объемный заряд электронов в области катода. Катодная сетка полезна для предотвращения доступа к управляющей сетке положительных ионов с катода, что имеет практическое значение для ламп с оксидным катодом, у которых такая эмиссия значительна.

73. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Полупроводниками называют твердые вещества с электропроводностью, создаваемой перемещением электронов, имеющие особые электрические свойства и занимающие по своей удельной электропроводности γ промежуточную область между проводниками.

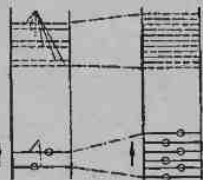


Рис. 74. Энергетические спектры электронов свободного атома

К числу электрических свойств полупроводников относится сильное изменение удельной электропроводности под влиянием внешнего электрического поля, нагрева, облучения видимым светом и других факторов. Благодаря этому свойству полупроводники широко используются для создания таких приборов, как вентили, усилители и др. Полупроводниковые кристаллические приборы, выполняющие функции двух- и трехэлектродных ламп, обладают большими преимуществами перед электронными лампами: они имеют в несколько раз меньшие габариты и меньшие объем и вес; в них отсутствует накаливаемый катод, т. е. не расходуется мощность на накал, а рабочий режим устанавливается мгновенно; они позволяют получить больший КПД; они имеют большую механическую прочность и в 10—50 раз больший срок службы. К полупроводникам относятся селен, германий, кремний, теллур, а также ряд окислов, сульфидов и карбидов. Электроны свободного атома, находящегося в нормальном состоянии, имеют определенные уровни энергии 1 (рис. 74). Чем больше удалена от

74. СВОЙСТВА P-N-ПЕРЕХОДА

В полупроводниковых приборах применяются два вида контактных соединений: между полупроводниками, имеющими различные типы проводимости, и между полупроводником и металлом.

В первом случае создается контакт на граница между областями с проводимостью типа n и проводимостью типа p , называемой p - n -переходом.

Контактные соединения полупроводника с металлом осуществляются либо в виде точечного контакта между кристаллом и острием металлической проволочки, либо в виде плоскостного контакта, в котором полупроводник и металл соприкасаются по большой поверхности. В приборах с точечным контактом используются свойства p - n -перехода. Основная масса кристалла, применяемого в этих приборах, обладает проводимостью одного типа, а небольшие участки на поверхности кристалла — проводимостью другого типа. Последняя создается благодаря наличию примесей в кристалле полупроводника. Такие участки имеют диаметр порядка десятков микрон. Размеры острия контактной проволочки, находящейся на участке, должны быть меньше размеров самого участка, и поэтому электрическая цепь в приборе замыкается только через p - n -переход.

Образование p - n -перехода у плоскостных контактов между полупроводником и металлом объясняется на основе предположения о наличии большого количества игольчатых переходов между плоскостями полупроводника и металла, каждый из которых действует аналогично рассмотренным выше точечным контактам.

Пограничные области полупроводников типов p и n , находящиеся в пределах двойного электрического слоя, лишаются части своих основных носителей за-

75. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТОЧЕЧНЫХ ТРИОДОВ

Применение металлического дна с выводами и приварка колпачка прибора ко дну (рис. 76а) позволяют получить лучшую герметизацию.

Электрод 1 включается в цепь усиливаемых колебаний (рис. 76б) и называется эмиттером. Электрод 2 соединяется с цепью нагрузочного сопротивления и носит название коллектора. Третьим электродом является основание (база).

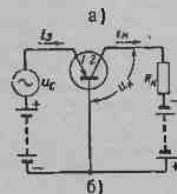
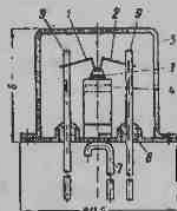


Рис. 76. Точечный германиевый триод: а) устройство триодов типов C_3 и C_4 ; б) схема включения

Если на эмиттер подать положительное, а на коллектор отрицательное напряжение относительно основания, то величина обратного тока цепи коллектора i_c будет находиться в прямой зависимости от величины прямого тока эмиттера i_e .

В цепь эмиттера, кроме напряжения усиливаемого сигнала, подается постоянное напряжение (доли вольта). В цепи коллектора напряжение источника питания составляет несколько десятков вольт.

Если в вакуумном триоде ток нагрузочной цепи (анодный ток) i_a зависит от входного усиливаемого напряжения сеточной цепи i_c , то в полупроводниковом триоде ток нагрузочной цепи i_c зависит от усиливаемого тока i_e . Усиление тока германиевым триодом характеризуется величиной статического коэффициента усиления по току:

$$\alpha = \frac{\partial i_c}{\partial i_e}$$

при $u_c = \text{const}$, который может быть найден из соответствующего семейства вольт-амперных характеристик.

Цепь эмиттера можно рассматривать как цепь диода, включенного в проводящем направлении и имеющего поэтому относительно малое сопротивление, составляющее сотни ом. Небольшое изменение напряжения Δu приводит к значительному изменению ее тока Δi . Замена точечных контактов контактными поверхностями с большой площадью позволила создать приборы с относительно большой выходной мощностью, достигающей до 1 000 ватт.

В последнее время созданы некоторые типы германиевых триодов, устойчиво работающие при температурах $p-n$ -перехода до 100–110 °C.

рядов и имеют высокое электрическое сопротивление. Они называются запирающим слоем.

Если $p-n$ -переход включить в цепь источника электрической энергии так, что к области с проводимостью типа p будет приложен положительный потенциал относительно n -области (рис. 75), то в обеих областях основные носители заряда под действием внешнего поля начнут перемещаться к $p-n$ -переходу, т. е. навстречу друг другу. При этом слой, близкий к $p-n$ -переходу, пополняется основными носителями заряда. Сопротивление $p-n$ -перехода снижается, и уменьшается потенциальный барьер.

Например, в p -области больше основных носителей заряда, чем в n -области, протекание через переход основной части тока будет определяться перемещением дырок. В противном случае протекание основной части тока определяется перемещением свободных электронов. В обоих случаях через переход может проходить большой (прямой) ток.

Таким образом, $p-n$ -переход, пропускающий большой ток в прямом направлении и очень малый ток в обратном направлении, обладает вентильными свойствами.

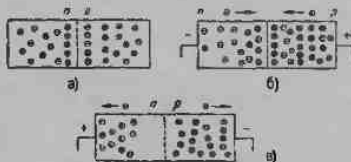


Рис. 75. Явления в $p-n$ -переходе:

- а) без воздействия внешнего электрического поля; б) при воздействии внешнего поля в направлении прямой проводимости; в) при воздействии внешнего поля в направлении обратной проводимости.

ядра оболочка, в которой находится движущийся вокруг ядра электрон, тем выше уровень энергии последнего. В рассматриваемом изолированном атоме одинаковые уровни энергии могут иметь только два электрона или на каждом из энергетических уровней может находиться не более двух электронов. Электрон переходит с одного энергетического уровня на другой, если сообщит ему дополнительную энергию, равную некоторому целому числу квантов. Уровни энергии электронов возбужденного атома занимают верхнюю часть спектра 2.

Для твердого тела различают **заполненную зону** и **зону уровней возбуждения**, или свободную зону, разделенные энергетическим барьером. В пределах этого барьера находятся уровни энергии, на которых не могут находиться электроны.

Заполненная зона характеризуется тем, что все уровни ее заполнены электронами при температура 0 °K. **Зона уровней возбуждения** содержит уровни со значительно более высокими энергиями. Электроны, обладающие такими энергиями, могут передвигаться от одного атома кристалла к другому и тем самым обеспечивают прохождение тока проводимости.

У металлов заполненная и свободная зоны непосредственно примыкают друг к другу, а в некоторых случаях эти зоны взаимно перекрываются. Поэтому электрон может перейти из первой зоны во вторую, получив извне очень небольшую добавочную энергию.

В **идеальном полупроводнике** без примесей при вырывании электронов из межатомных связей под действием подведенной извне энергии образуется столько же дырок, сколько свободных электронов. При отсутствии электрического поля, созданного внешними источниками электрической энергии, освободившиеся электроны движутся беспорядочно, пока не произойдет рекомбинация, т. е. заполнение электроном дырки. При наличии в полупроводнике примесей в нем преобладают дырки (при акцепторных примесях) или свободные электроны (при донорных примесях).

Наличие беспорядочного теплового движения электронов и дырок определяет возможность их диффузии из мест с большей концентрацией зарядов в места с меньшей концентрацией.

76. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УСИЛИТЕЛЯ

Электронным усилителем называется устройство, предназначенное для усиления электрического напряжения, тока или мощности при помощи электронных ламп или полупроводниковых приборов.

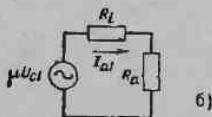
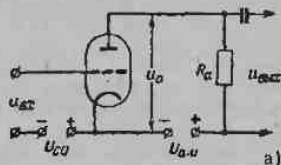


Рис. 77. Однокаскадный усилитель:

а) принципиальная схема; б) схема замещения

В геофизической аппаратуре такие электронные устройства, как усилители, имеют наибольшее распространение. На сейсмостанциях они используются для усиления сейсмоколебаний. Усилители играют важную роль в электронных схемах аппаратуры радиоактивной разведки, в полевых станциях электроразведки, измерительной аппаратуре, осциллографах и т. п.

Усилитель может содержать один или несколько усилительных каскадов. Усилительный каскад состо-

77. ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ

Важнейшими показателями работы усилителя является коэффициент усиления. Коэффициент усиления напряжения или тока представляет собой комплексное число, показывающее отношение соответственно напряжения или тока на выходе усилителя к напряжению или току на входе:

$$K = \frac{A_{\text{вых}}}{A_{\text{вх}}}$$

Выходной мощностью усиления называется полезная мощность, выделяемая в нагрузочном сопротивлении, включенном на выходе усилительного устройства:

$$P_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}^2}{2} \times \frac{\cos \varphi_n}{Z_n}$$

где $U_{\text{вых}}$ — амплитуда выходного напряжения;

Z_n — сопротивление нагрузки;

φ_n — угол сдвига фаз между током и напряжением.

Величина амплитуды переменного напряжения сигнала, поступающего на вход усилителя, может изменяться. Пределы изменений амплитуды входного напряжения или мощности при работе усилителя называются динамическим диапазоном. Верхний уровень динамического диапазона, которому соответствует максимальная мощность, ограничивается искажениями, возникающими в усилителях при больших амплитудах вследствие нелинейности характеристик электронных ламп. Нижний уровень динамического диапазона определяется величиной собственных шумов усилителя. Чтобы полезный сигнал не заглушался шумами, минимальное напряжение сигнала должно быть выше уровня этих шумов по меньшей мере на 3–10 дБ.

Собственные шумы усилителя возникают из-за собственных шумов электронных ламп, из-за шумов, появляющихся в элементах усилительной схемы, в сопротивлениях, из-за пульсаций напряжения источников питания, вызывающих помехи с частотой

78. КЛАССЫ УСИЛЕНИЯ

Различают три основных класса (режима) работы усилителей: А, В и С. Отличительными особенностями каждого класса усиления являются положение рабочей точки на анодно-сеточной характеристике лампы и величина амплитуды переменного входного напряжения $U_{сг}$ относительно напряжения сеточного смещения $U_{сг}$.

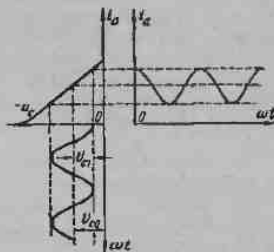


Рис. 78. Работа усилителя в режиме класса А

В режиме класса А (см. рис. 78) положение исходной рабочей точки выбирается так, чтобы она находилась на прямолинейном участке характеристики, а амплитуда переменного напряжения на сетке имеет величину, при которой сеточное напряжение не выходит за пределы прямолинейного участка характеристики и не заходит в область сеточных токов. Этот режим работы характеризуется непрерывным протеканием анодного тока. В режиме класса А нелинейные искажения минимальны, величина КПД очень низка и не

превышает 30 %, а постоянная составляющая анодного тока i_{a0} имеет значительную величину.

При работе усилителя в режиме класса *B* положение исходной рабочей точки совпадает с началом анодно-сеточной характеристики. В этом случае анодный ток протекает только одну половину периода, а вторую половину периода лампа заперта. Произведение угловой частоты ω на время t_1 , в течение которого анодный ток изменяется от максимального до нулевого значения, называют **углом отсечки** θ . В режиме класса *B* угол отсечки $\theta = 90^\circ$. При отсутствии входного сигнала анодный ток i_{a0} равен нулю или очень мал.

Если усилитель работает в режиме класса *B* без сеточных токов, то класс усиления называют B_1 , при наличии сеточных токов — B_2 .

Режим класса *B* характеризуется высоким КПД, достигающим до 60–70%.

При работе усилителя в режиме класса *C* исходная рабочая точка находится левее начала анодно-сеточной характеристики лампы. Поэтому анодный ток протекает в течение небольшого промежутка времени, меньше половины периода ($\theta = 90^\circ$). Величина КПД в этом случае достигает 80–90%.

Существуют классы усиления, промежуточные между рассмотренными. В классе усиления *AB* исходную рабочую точку располагают несколько правее начала анодно-сеточной характеристики, и поэтому угол отсечки становится больше 90° ($\theta = 90^\circ$). Аналогично сказанному выше для класса *B* класс *AB* при работе лампы без сеточных токов называют классом AB_1 , а при работе с сеточными токами — AB_2 .

этих пульсаций (шумы, вызванные этой причиной, называются **фоном**), из-за электростатических и электромагнитных воздействий внешних цепей, вызывающих помехи в цепи усилителя.

Шумы и помехи, возникающие в первом каскаде усилителя, усиливаются всеми последующими каскадами и сильно сказываются на выходе. Шумы, возникающие в других каскадах и создающие на выходе в десятки и сотни раз меньшее напряжение, практически можно не учитывать. При работе усилитель вносит в усиливаемый сигнал искажения. Различают частотные (амплитудно-частотные), фазовые (фазочастотные) и нелинейные искажения.

Частотные искажения возникают в результате непостоянства коэффициента усиления на различных частотах. Их создают элементы усилителя (конденсаторы, дроссели, трансформаторы), сопротивления которых зависят от частоты. Количественно частотные искажения оцениваются при помощи коэффициента частотных искажений *M*, равного отношению модуля коэффициента усиления на средних частотах K_0 к модулю коэффициента усиления на данной частоте *K*:

$$M = \frac{K_0}{K}$$

в области высших частот:

$$M_B = \frac{K_{CB}}{K_A}$$

а в области низших частот:

$$M_N = \frac{K_0}{K_n}$$

где K_0 и K_n — модули коэффициентов усиления на высших и низших частотах.

Фазовые искажения возникают из-за наличия в схеме усилителя элементов, обладающих индуктивностью и емкостью. Эти искажения проявляются в нарушении фазовых соотношений между отдельными гармоническими составляющими сложного сигнала.

ит из усилительной лампы или полупроводникового триода и непосредственно присоединенных к ним других элементов схемы (сопротивлений, конденсаторов, трансформаторов и т. п.). В схеме простейшего однокаскадного лампового усилителя (рис. 77) в качестве анодной нагрузки включено активное сопротивление R_a . Подлежащее усилению напряжение U_{ax} подводится к сеточной цепи лампы.

При отсутствии *I* в анодной цепи лампы протекает постоянный ток I_{a0} , величина которого определяется анодным напряжением и постоянным напряжением сеточного смещения U_{c0} . Появление переменного напряжения $U_{ax} U_{ca}$ с амплитудой U_{ca} вызывает изменение анодного тока, в котором появляется переменная составляющая с амплитудой i_{a1} . На зажимах сопротивления R_a создается напряжение, содержащее постоянную составляющую $I_{a0} R_a$ и переменную $i_{a1} R_a$.

Последняя может быть значительно больше, чем амплитуда U_{ax} напряжения, поданного на вход усилителя. Путем включения конденсатора, пропускающего только переменный ток, но не пропускающего постоянный ток, можно выделить переменное напряжение с амплитудой $U = i_{a1} R_a$, которое и представляет собой усиленное напряжение $U_{вых}$ на выходе усилителя.

79. ВИДЫ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ. УСИЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ

Усилители напряжения. Все каскады ламповых усилителей, за исключением выходного, предназначены для усиления напряжения, и цепи их не рассчитываются на передачу значительной мощности. Усиление мощности обычно сосредоточивается в выходном каскаде. В усилителе на полупроводниковых триодах каждый каскад рассчитывается на передачу мощности.

Подбором коэффициента трансформации $k = \frac{W_2}{W_1} < 1$

можно добиться большой величины нагрузочного сопротивления R_n , равного входному сопротивлению $R_{вх}$ последующего каскада, приведенному к первичной

цепи трансформатора $\left(R_n = \frac{R_{вх}}{k^2} \right)$.

Использование трансформаторной связи оказывается часто неудобным. В низкочастотном усилителе трансформаторы могут иметь большие габариты, чем полупроводниковые триоды, что сводит на нет преимущества малогабаритности, присущие полупроводниковым приборам.

Для согласования сопротивлений двух каскадов с RC-связью помещают между ними каскад с другой, чем у них, схемой включения триода. Для согласования сопротивлений двух каскадов с общим эмиттером между ними включают каскад с общим коллектором (рис. 79).

Такой каскад, дающий незначительное усиление, обладает значительно большим входным сопротивлением, чем каскад с общим эмиттером, при одинаковых величинах нагрузочного сопротивления.

80. ДВУХТАКТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

В тех случаях, когда необходимая для увеличения колебательной мощности работа лампы с сеточными токами приводит к появлению недопустимых нелинейных искажений либо получаемая от одной лампы колебательная мощность недостаточна, применяют усилители, работающие по двухтактной схеме (см. рис. 80). В этой схеме лампы включены симметрично относительно цепей источников питания и работают в одинаковых режимах.

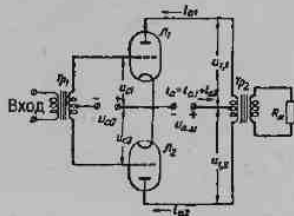


Рис. 80. Принципиальная схема двухтактного усилителя мощности

Наиболее часто двухтактный каскад используют для работы в режиме класса В. При подаче переменного напряжения от входного трансформатора Tr_1 (рис. 80) лампы L_1 и L_2 работают по очереди, пропуская переменную составляющую тока в течение того полупериода этого напряжения, когда в цепь сетки данной лампы подается положительное напряжение сигнала. Анодный ток лампы L_1 протекает через верхнюю (на схеме) половину первичной обмотки выходного трансформатора Tr_2 , а анодный ток лампы L_2 — через нижнюю половину этой обмотки. В сердечнике трансформатора Tr_2 магнитный поток, создаваемый попеременно этими токами, изменяется синусоидально, и на зажи-

81. УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТРИОДАХ

Рассмотрим названные усилители мощности.

Оконечные каскады на полупроводниковых триодах должны обеспечивать получение заданной выходной мощности, которая обычно значительно превосходит мощность каскадов предварительного усиления.

При расчете окончных каскадов приходится учитывать такие факторы, как мощность, выделяемая на коллекторе, и искажения сигнала, которым в каскадах предварительного усиления обычно не уделяют внимания.

В каскадах усиления мощности используются плоскостные триоды, которые характеризуются большей мощностью, рассеиваемой коллектором, и выносят в сигнал меньшие нелинейные искажения, чем точечные (рис. 82).

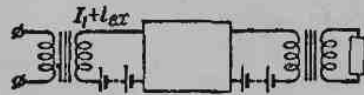


Рис. 82. Структурная схема каскада усиления мощности на полупроводниковом триоде

Во входной цепи усилителя на триоде протекает синусоидальный ток $i_{вн}$, обусловленный сигналом, и I_1 — постоянный ток смещения (рис. 83б).

Мгновенное значение тока этой цепи определяется суммой I_1 . Изменяя ток смещения $I_1 + i_{вн}$, можно создать такие режимы работы, при которых входная цепь триода будет проводящей в течение всего периода либо только в продолжение части его. Если амплиту-

да тока входного сигнала меньше I_1 , то триод работает в течение всего периода и работает в режиме класса А (рис. 83а и 83б).

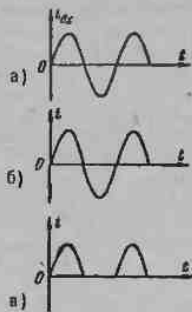


Рис. 83. Графики тока:

а) на входе при работе усилителя в режиме класса А;

б) на выходе при работе в режиме класса А;

в) на выходе при работе в режиме класса В

мах вторичной обмотки выходного трансформатора получается синусоидальное напряжение.

Отсутствие тока покоя ламп исключает возможность создания автоматического сеточного смещения за счет анодного тока. Уменьшение i из-за отсутствия составляющей тока покоя при заданной величине $P_{\text{выпуск}}$ лампы позволяет повысить анодное напряжение, что приводит к увеличению полезной мощности, отдаваемой каскадом.

Для усилителей, работающих в режиме класса В, необходимо применять лампы с анодно-сеточными характеристиками, имеющими короткие криволинейные участки в области, близкой к оси u_c .

Для работы в классе А двухтактные каскады используются редко.

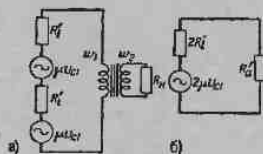


Рис. 81. Схемы замещения двухтактного каскада:

а) последовательная; б) преобразованная

Двухтактный усилитель мощности с симметричными плечами схемы может быть представлен схемой замещения, показанной на рисунке 81а. Здесь каждая лампа заменена генератором с эквивалентной ЭДС $= \mu U_c$ и внутренним сопротивлением R'_n , где R'_n представляет собой приведенное внутреннее сопротивление лампы, определяемое с учетом того, что переменная составляющая анодного тока протекает лишь в течение части периода. В частности, в режиме класса А $R'_n = R_n$, а в режиме класса В $R'_n = 2R_n$.

Электродвижущая сила, равная $2\mu U_c$, действует в последовательной цепи, содержащей внутренние сопротивления эквивалентных генераторов $2R'_n$ и сопротивление нагрузки $R'_n = R_n / k^2$ (рис. 81б).

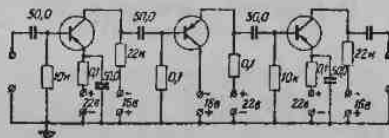


Рис. 79. Схема усилителя на плоскостных триодах с $\alpha = 0,9$, дающего усиление до 60 дБ

Виды обратной связи. Обратной связью называется передача части энергии с выхода усилителя (или каскада) на его вход. Для получения обратной связи в усилитель вводят специальную цепь обратной связи. Через эту цепь часть напряжения с выхода

каскада подается на его вход. Величина $\beta = \frac{\dot{U}_{o.c.}}{\dot{U}_{max}}$, по-

казывающая отношение напряжения на выходе цепи обратной связи $\dot{U}_{o.c.}$ к напряжению на входе этой цепи \dot{U}_{max} , называется **коэффициентом передачи обратной связи**.

В общем случае β является комплексной величиной. В цепи сетки усилительной лампы при наличии обратной связи действует напряжение (не считая сеточного смещения U_{ca}): $u_c = u_{an} + u_{c.c.}$.

Если в результате действия обратной связи общий коэффициент усиления уменьшается, то связь называют **отрицательной**; если же общий коэффициент усиления возрастает, то связь называют **положительной**. Различают **искусственную** и **паразитную обратные связи**. Первая создается с целью улучшения работы усилительного устройства, а вторая возникает в цепях усилителя самопроизвольно и вредно сказывается на его работе, вызывая искажения, помехи и даже самовозбуждение усилителя (положительная обратная связь).

82. ГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ТИПА RC

Электронным генератором является устройство, содержащее в качестве основного элемента электронную лампу или полупроводниковый триод и преобразующее энергию постоянного тока в энергию электрических колебаний необходимой формы и частоты.

Электронные генераторы разделяются на генераторы гармонических колебаний и генераторы релаксационных колебаний.

Генераторы типа LC являются основным узлом передающих радиостанций и радиоприемников; они применяются в составе приборов, предназначенных для наладки и настройки электронных устройств, служат для создания электрических колебаний, используемых при геофизической разведке. В схему генератора этого типа обязательно входит параллельный колебательный контур.

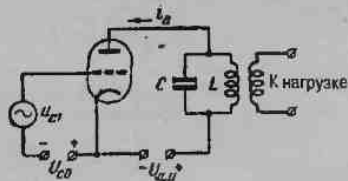


Рис. 84. Принципиальная схема генератора типа LC

В схеме простейшего генератора (рис. 84) в цепи сетки лампы действуют постоянное напряжение U_{c0} и переменное напряжение $u_{c1} = U_{c1} \cos \omega t$, а в анодной цепи — постоянное напряжение источника U_{a1} . В случае работы лампы с непрерывным анодным то-

83. ГЕНЕРАТОРЫ С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТРИОДАХ

В автогенераторах на полупроводниковых триодах используют обратную связь по току. Самовозбуждение генератора возможно, только если коэффициент усиления по мощности полупроводникового триода на данной частоте больше 1.

Самовозбуждение легко получить в генераторах типа LC, собранных по схеме с общим основанием или общим эмиттером, причем у генератора, собранного по схеме с общим основанием, напряжение на выходе должно совпадать по фазе с напряжением на входе, а у генератора с общим эмиттером эти напряжения должны находиться в противофазе.

При работе на высокой частоте параметры полупроводникового триода становятся комплексными величинами вследствие влияния собственной емкости $p-n$ -переходов и других причин. Поэтому меняются фазовые соотношения между токами эмиттера и коллектора.

В этом случае цель обратной связи должна быть построена таким образом, чтобы создавать сдвиг по фазе между выходным током триода и выходным током цепи обратной связи, равный по величине и противоположный по знаку сдвигу фаз между входным и выходным токами триода.

На рисунке 85 приведены две схемы генераторов с самовозбуждением, построенные на полупроводниковых триодах с общим эмиттером.

Положительный постоянный потенциал на эмиттере и отрицательный на коллекторе относительно основания создаются путем подбора сопротивлений

R_3, R_2, R_1 .

84. ГЕНЕРАТОРЫ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ НА БИЕНИЯХ

В ряде устройств, связанных с геофизической разведкой, лабораторными исследованиями, измерительными схемами, применяются генераторы гармонических колебаний звуковых частот (10–30 Гц / 15 – < 20 кГц).

Рассмотренные генераторы типа LC мало пригодны для генерации колебаний звуковых частот, так как при этих частотах колебательный контур должен обладать очень большой индуктивностью L или емкостью C.

В первом случае одновременно с L растет активное сопротивление контура R, а добротность контура $Q = \omega_0 L / R$ при этом убывает.

Во втором случае рост емкости уменьшает величину характеристического сопротивления контура

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C},$$

что также приводит к снижению добротности.

Уменьшение добротности контура приводит к уменьшению стабильности частоты генератора. Перестройка контура для изменения частоты в пределах указанного диапазона требует плавного изменения индуктивности или емкости в 10^4 – 10^6 раз.

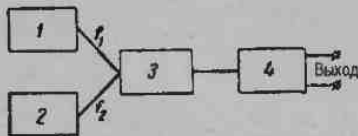


Рис. 86. Структурная схема генератора на биениях:

- гетеродин с постоянной частотой;
- гетеродин с переменной частотой;
- преобразователь частоты;
- усилитель

Для генерации колебаний звуковых частот используются два высокочастотных генератора типа LC , образующих генератор на биениях (рис. 85).

Один из генераторов типа LC настроен на постоянную частоту f_1 , а другой имеет плавную настройку, и его частота f_2 может изменяться от f_1 до f_2 . Обычно $f_1 = 200$ кГц, а f_2 изменяется в пределах 200–180 кГц.

Колебания от обоих генераторов, называемых гетеродинами, подаются в преобразователь частоты, на выходе которого получается напряжение разностной частоты $f_3 = f_1 - f_2$.

В случае необходимости это напряжение усиливается. Так как разностная частота f_3 соответствует частоте биений высокочастотных колебаний, то такой генератор называют генератором на биениях.

Генераторы на биениях не дают стабильных по частоте колебаний, так как если частота одного из гетеродинов отклоняется на Δf от своего номинального значения, то на такую же величину изменяется частота биений.

Хотя по отношению к частоте гетеродина величина Δf может быть очень малой, она может оказаться недопустимо большой относительно частоты биений.

Например, при $f_1 = 200$ кГц и $f_2 = 40$ кГц и относительно малой нестабильности гетеродина, равной 0,001 % Δf составит 2 Гц. При этом относительное

отклонение частоты $f_3 = \frac{2}{40} \times 100\% = 5\%$.

В схеме (рис. 85а) параллельный контур L_1, C_1 представляет собой нагрузку в цепи коллектора, а в схеме (рис. 85б) те же элементы L_1 и C_1 образуют последовательный контур.

Соотношение емкостей конденсаторов C_2 и C_3 определяет величину напряжения обратной связи. Эти генераторы создают колебания с частотой до 2 МГц. Генерируемая частота у них зависит от напряжения источника питания и изменяется на 0,01 % у генератора, собранного по первой схеме, и на 0,001 % у генератора, собранного по второй схеме, при изменении напряжения на 1 В.

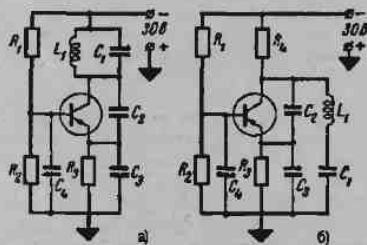


Рис. 85. Схемы генераторов на полупроводниковых триодах:
а) с параллельным контуром;
б) с последовательным контуром

ком этот ток содержит постоянную составляющую I_{a0} и переменную составляющую $I_{a1} \cos \omega t$, совпадающую по фазе с переменным напряжением на сетке. При работе лампы с отсчетками тока анодного ток содержит, кроме постоянной составляющей I_{a0} , переменные составляющие с частотой сетевого напряжения $I_{a1} \cos \omega t$ и более высокими частотами: $I_{a2} \cos 2\omega t \dots I_{an} \cos n\omega t$.

Как известно, при настройке колебательного контура на частоту f_0 его сопротивление имеет максимальную величину $Z_0 = R_0$ для тока этой частоты. Сопротивление контура при частоте f_0 (в л раз большей резонансной) составляет:

$$Z_{nr} = R_0 \frac{n}{n^2 - 1} d,$$

где d — затухание контура.

Для постоянной составляющей анодного тока сопротивление контура практически равно нулю.

При колебаниях с непрерывной кривой анодного тока переменная составляющая этого тока создает на контуре напряжение $u = I_{a1} R_0 \cos \omega_0 t$. В других режимах, несмотря на протекание анодного тока в виде синусоидальных импульсов, напряжение на контуре изменяется непрерывно. Оно определяется первой гармонической составляющей анодного тока. Вышние гармонические составляющие напряжения на контуре практически не создают, так как сопротивление контура для них очень мало. Поэтому на контуре создается гармоническое напряжение частоты.

Переменное напряжение заданной частоты f_0 можно подавать на сетку лампы генератора от постороннего источника гармонических колебаний или из анодной цепи этой же лампы. От постороннего источника напряжение подается в генераторах независимого возбуждения, являющихся, по сути дела, резонансными усилителями мощности, а из анодной цепи — в генераторах с самовозбуждением или в автогенераторах.

85. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Для получения постоянного тока, необходимого для питания разнообразных схем электроники, зарядки аккумуляторов и других целей, широко применяются выпрямительные устройства, преобразующие энергию переменного тока в энергию постоянного тока.

Выпрямительное устройство, или выпрямитель, содержит три основных элемента (рис. 87): трансформатор 1, электрический вентиль 2 и фильтр 3.

Трансформатор изменяет величину переменного напряжения, получаемого от источника питания, приводя ее в соответствие с требуемой величиной выпрямленного напряжения.

Когда величина напряжения источника питания соответствует требуемому выпрямленному напряжению, необходимость в трансформаторе отпадает.

Вентиль осуществляет основную функцию выпрямителя — преобразует переменный ток в постоянный.

В качестве вентилях в выпрямителях применяют электронные лампы — кенотроны, полупроводниковые диоды (селеновые, меднозакисные, германиевые и кремниевые), а также ионные приборы.

Фильтр служит для сглаживания пульсаций выпрямленного тока (напряжения) на выходе выпрямителя.

Выпрямители, применяемые в геофизических устройствах, рассчитаны на малые мощности (порядка десятков и сотен ватт) и работают от однофазной сети.

Такие выпрямители называются однофазными.

86. СТАБИЛИЗАТОР ТОКА

Стабилизаторы тока служат для поддержания постоянства величины тока нагрузки при изменениях ее сопротивления и колебаниях питающего напряжения. Они применяются значительно реже, чем стабилизаторы напряжения.

Простейшие стабилизаторы тока могут быть созданы с помощью нелинейного элемента, обладающего большим внутренним сопротивлением, у которого на определенном участке вольт-амперной характеристики ток очень мало зависит от приложенного напряжения (участок *ab* на рис. 88). Включением такого элемента последовательно с нагрузкой (рис. 88а) можно обеспечить весьма малые изменения тока при значительных изменениях напряжения источника питания.

Напряжение питания в исходном режиме U_{10} должно быть таким, чтобы рабочая точка находилась на пологом участке характеристики стабилизирующего элемента, т. е.

$$U_{10} = U_0 + U_{ст}$$

где U_0 — напряжение на стабилизирующем элементе в исходном режиме;

$U_{ст}$ — напряжение на нагрузке.

Для оценки стабилизирующего действия устройства вводятся понятия коэффициентов стабилизации тока. Нагрузочный ток $I_{ст}$ является функцией входного напряжения и сопротивления нагрузки: $I_{ст} = \Phi(U_1, R_n)$, а его изменение определяется полным дифференциалом этой функции:

$$dI_{ст} = \frac{\partial I_{ст}}{\partial U_1} dU_1 + \frac{\partial I_{ст}}{\partial R_n} dR_n$$

87. СТАБИЛИЗАТОР ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Напряжение на выходе стабилизатора U_2 является функцией входного напряжения U_1 и сопротивления нагрузки R_n : $U_2 = \Phi(U_1, R_n)$. Изменение U_2 определяется полным дифференциалом этой функции:

$$dU_{ст} = \frac{\partial U_{ст}}{\partial U_1} dU_1 - \frac{\partial U_{ст}}{\partial R_n} dR_n$$

Обозначим через $U_{ст}$ заданную величину напряжения на выходе, около которой изменяется U_2 , и через U_{10} соответствующую величину U_{10} входное (номинальное) напряжение, около которого изменяется U_1 .

Величина $K'_{ст} = \frac{\partial U_2}{\partial U_1} \cdot \frac{U_{ст}}{U_{10}}$, связывающая относи-

тельное изменение напряжения на входе с относительным изменением напряжения на выходе, называется коэффициентом стабилизации напряжения при

постоянной нагрузке. Величина $K'_{ст} = \frac{\partial R_n}{\partial R_n} \cdot \frac{\partial U_{ст}}{\partial U_{ст}}$ пред-

ставляет собой коэффициент стабилизации напряжения при постоянной величине напряжения питания. Здесь $R_{н.в}$ — сопротивление нагрузки, около которого изменяется R_n . Чем больше величины $K'_{ст}$ и $K'_{ст.н}$, тем совершеннее стабилизатор напряжения.

Стабилизация напряжения с помощью стабилизатора может осуществляться при токах нагрузки, не превышающих 25–30 мА. Величина коэффициента стабилизации $K'_{ст}$ в этом случае обычно лежит в пределах 8–30.

В практике находят применение схемы включения стабилизаторов, в которых несколько звеньев, содержащих эти приборы, соединяются последовательно (рис. 89). В этом случае выходное напряжение первого каскада $U_{ст1}$ должно быть больше выходного напряжения второго каскада $U_{ст2}$. Поэтому в первом каскаде включают последовательно два стабилизи-

на либо подбирают стабилитрон с большим напряжением горения, чем во втором каскаде. Величины сопротивлений R_{n1} и R_{n2} выбирают такими, чтобы стабилитроны работали в нормальном режиме.

Коэффициент стабилизации многокаскадной схемы равен произведению коэффициентов стабилизации ее каскадов. С увеличением числа каскадов он возрастает, но одновременно повышается напряжение, которое необходимо подать на вход устройства.

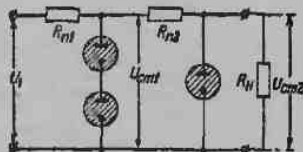


Рис. 89. Схема каскадного включения стабилитронов

У электронных стабилизаторов постоянного напряжения коэффициент стабилизации достигает тысяч, а ток нагрузки может быть относительно большим. Их выходное сопротивление может быть с очень малым — порядка нескольких ом, что очень важно для устройств, где стабилизатор является источником питания многокаскадных усилительных схем. В этом случае малое сопротивление источника питания снижает возможность возникновения самовозбуждения из-за обратной связи через цепь источника.

В рассматриваемых стабилизаторах напряжения роль стабилизирующего элемента, воздействующего на выходное напряжение, играет электронная лампа, которая может включаться последовательно с нагрузочным сопротивлением или параллельно ему.

В стабилизаторе последовательного типа лампа работает как переменное сопротивление, величина которого автоматически изменяется так, что при этом обеспечивается постоянство напряжения на зажимах нагрузочного сопротивления.

Обозначим через $I_{сг0}$ заданную величину тока, около которой изменяется стабилизированный ток нагрузки

$$I_{сг}. \text{ Величина } K'_{сг} = \frac{\partial U_{сг}}{U_{п0}} \cdot \frac{\partial I_{сг}}{I_{сг0}}$$

связывающая относительное изменение напряжения на входе с относительным изменением тока в нагрузочном сопротивлении при постоянной величине последнего, называется коэффициентом стабилизации тока при постоянной нагрузке.

$$\text{Величина } K''_{сг} = \frac{\partial R_{н}}{R_{н0}} \cdot \frac{\partial I_{сг}}{I_{сг0}}$$

представляет собой коэффициент стабилизации тока при постоянной величине напряжения питания.

При идеальном стабилизирующем элементе, у которого $R_{н} = \frac{\partial U_{сг}}{\Delta I_{сг}} = \infty$ и $\partial I_{сг} = 0$, $K'_{сг} = K''_{сг} = \infty$, практические коэффициенты стабилизации тока имеют конечные значения.

При идеальном стабилизирующем элементе, у которого $R_{н} = \frac{\partial U_{сг}}{\Delta I_{сг}} = \infty$ и $\partial I_{сг} = 0$, $K'_{сг} = K''_{сг} = \infty$, практические коэффициенты стабилизации тока имеют конечные значения.

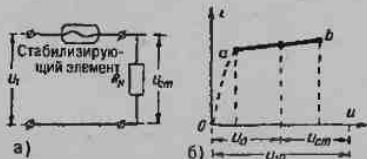


Рис. 88. Стабилизация тока:
а) схема включения нелинейного элемента;
б) вольт-амперная характеристика нелинейного элемента

Они делятся на:

- 1) однополупериодные, в которых ток может проходить через клапан каждый период переменного напряжения только в течение одной половины периода;
- 2) двухполупериодные, в которых ток проходит через клапаны в течение обоих полупериодов.

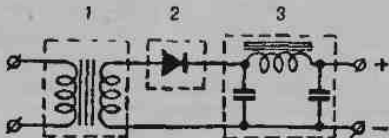


Рис. 87. Выпрямительное устройство

В выпрямителях геофизической аппаратуры обычно используются электронные и полупроводниковые клапаны.

88. АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ

Радиосвязью называют передачу сообщений при помощи электромагнитных волн высокой частоты. В зависимости от формы сообщений различают следующие виды радиосвязи: радиотелеграфию, радиотелефонию и телевидение.

Радиосвязь может быть односторонней и двусторонней. В первом случае из одного пункта осуществляется лишь передача сообщений, а в другом пункте производится только их прием. При двусторонней радиосвязи каждый из пунктов, между которыми установлена связь, может вести как передачу, так и прием.

Одностороннюю радиосвязь, действующую так, что передачи одной радиостанции принимаются одновременно многими корреспондентами, принято называть радиовещанием.

В геофизических партиях имеют служебное применение устройства двусторонней радиосвязи для передачи-приема телеграфных и телефонных сообщений, отметок времени взрыва в сейсмозаписке и приема радиовещательных звуковых передач.

В пункте I (рис. 90), из которого ведется передача, находятся радиопередающее устройство (передатчик) и передающая антенна. Необходимую для работы передатчика электрическую энергию дает источник питания. В передатчике генератор тока высокой частоты преобразует эту энергию в энергию электрических колебаний радиочастоты. Устройство управления током высокой частоты изменяет параметры этих колебаний в соответствии с параметрами токов, соответствующих передаваемому сообщению. Выход передатчика соединен с передающей антенной, в которую лопутает преобразованный ток высокой частоты. Антенна излучает электромагнитную энергию, и в пространстве, окружающем антенну, возникают электромагнитные волны, распространяющиеся со скоростью света.

В приемной антенне пункта II, где производится прием сообщений, под действием электромагнитного поля наводится ЭДС высокой частоты. Напряжение от антенны подводится ко входу приемника. В приемнике имеются колесательные системы, которые настраи-

89. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН РАЗЛИЧНЫХ ДЛИН

Сущность амплитудной модуляции. Для передачи сообщений при помощи колебаний высокой частоты требуется изменять параметры этих колебаний в соответствии с передаваемыми сообщениями.

Управление током высокой частоты при помощи колебаний звуковых частот (речи, музыки) называется **модуляцией**. Управление этим током с помощью импульсов постоянного тока, создаваемых телеграфным аппаратом, носит название **манипуляции**.

Параметрами гармонического тока высокой частоты $i_{\omega} = I_{\omega} \sin(\omega t + \varphi_0)$ являются: амплитуда I_{ω} , частота ω и начальный фазовый угол φ_0 .

Для осуществления модуляции можно управлять любым из них. Различают три вида модуляции:

- 1) амплитудную;
- 2) частотную;
- 3) фазовую.

Амплитудная модуляция наша самое широкое распространение из-за относительной простоты ее осуществления и несложности необходимой для этого аппаратуры.

При амплитудной модуляции изменяют во времени амплитуду тока высокой частоты. При этом величина амплитуды колеблется около среднего значения.

К устройству, непосредственно изменяющему амплитуду тока высокой частоты, подводятся колебания высокой частоты $i_{\omega} = I_{\omega} \sin \omega t$ — модулируемый ток и колебания звуковой частоты $i_{\Omega} = I_{\Omega} \cos \Omega t$ — модулирующий ток (косинусоидальный закон изменения модулирующего тока и $\varphi_0 = 0$ приняты здесь для упрощения анализа).

Амплитуда модулированного тока:

$$I = I_{\omega} + I_{\Omega} \cos \Omega t$$

90. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАДИОСВЯЗИ

Длинные волны ($\lambda = 3000-30\ 000$ м) используются в специальных видах радиосвязи, в радиотелеграфных станциях, предназначенных для передачи метеосводок, сигналов времени. Эти волны днем и ночью легко отражаются от самых низких слоев ионосферы. Как поверхность этих слоев, так и поверхность земли при распространении длинных волн ведет себя как проводник.

Поверхностная волна играет основную роль при распространении энергии на небольших расстояниях от передатчика. На расстояния, превышающих несколько сотен километров, напряженность поля пространственной волны оказывается существенно большей напряженности поля поверхностной волны.

Длинные волны характеризуются постоянством условий распространения. Колебания напряженности поля в месте приема определяются суточными изменениями ионизации, проявляющимися в усилении напряженности поля.

Средние волны ($\lambda = 200-3000$ м) применяются для радиовещания, телеграфной и телефонной связи. В этом диапазоне используются как поверхностная, так и пространственная волны. В дневные часы пространственная волна, отражаясь от ионосферы, теряет очень большую часть энергии. Поэтому днем главную роль играет поверхностная волна. Ночью исползуется пространственная волна, так как слой ионосферы D отсутствует, а слой E отражает волну без значительного поглощения энергии.

С наступлением темноты дальность радиосвязи на средних волнах резко возрастает. Время года также влияет на распространение этих волн.

Амплитуда напряженности поля поверхностной волны убывает по мере удаления от передатчика и особенно резко на небольших расстояниях от него.

Интенсивность поля пространственной волны с ростом расстояния от передатчика сначала растет, а затем начинает медленно убывать. Поле же поверхностной волны здесь мало.

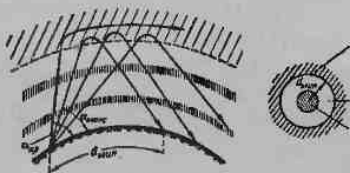


Рис. 91. Зона молчания

Наименее устойчив прием в зоне, куда одновременно приходят пространственная и поверхностная волны с близкими по величине амплитудами. Фаза пространственной волны непрерывно меняется, так как условия прохождения ею пути от передатчика до места приема не остаются постоянными из-за изменений в ионосфере (рис. 91). Пространственная и поверхностная волны интерферируют, и так как фаза первой из них непостоянна, то суммарная напряженность поля постоянно изменяется. В частности, при сдвиге фаз 180° между колебаниями обоих видов волн в месте приема результирующая напряженность очень мала и прием практически прекращается. Это явление называют **замиранием**.

Промежуточные волны ($\lambda = 60-200$ м), выделяемые из коротковолнового диапазона (10-200 м), используются для радиосвязи на небольших расстояниях: в экспедициях, сельском хозяйстве и т. п.

Распространение энергии на промежуточные волны может осуществляться пространственной и поверхностной волнами. Практически для связи на расстояниях порядка десятков километров используется поверхностная волна, обеспечивая устойчивый прием.

Короткие волны в диапазоне 10-60 м могут быть применены для связи как на небольших расстояниях, так и при расстояниях между передающей и приемной радиостанциями, достигающих нескольких тысяч километров. Возможно использование поверхностной волны, затухающей практически на расстоянии в несколько десятков километров. Ее прохождение практически не зависит от времени года и суток.

Введем обозначение $m = \frac{I_{\Omega}}{I_{\omega}}$, получим:

$$I_{\Omega} = m I_{\omega} \text{ и } I = I_{\omega} (1 + m \cos \Omega t).$$

После преобразований:

$$i = I_{\omega} \sin \omega t + \frac{I_{\omega} m}{2} \sin(\omega + \Omega) t + \frac{I_{\omega} m}{2} \sin(\omega - \Omega) t.$$

Колебания высокой частоты ω , модулированные колебания с частотой Ω , являются суммой трех синусоидальных колебаний с частотами ω , $\omega + \Omega$, $\omega - \Omega$. Колебания с частотой ω представляют собой ток, протекающий как при наличии, так и при отсутствии модуляции. Этот ток называют **током секущей частоты**, а токи двух других частот — **токами боковых частот**. Частота $\omega + \Omega$ называется **верхней боковой частотой**, а $\omega - \Omega$ — **нижней боковой частотой**.

Каждой передаче соответствует определенная полоса частот, равная $2F_{\text{мод}}.$ Для того чтобы исключить взаимные помехи, спектры частот разных передатчиков, сигналы которых могут приниматься одновременно в определенных зонах, не должны перекрывать друг друга.

Передающая радиостанция обычно вредает в антенну колебания, а в некоторых случаях в передатчике колебания несущей частоты подавляются и в антенну передаются колебания обеих боковых полос или даже одной боковой полосы. При этом в приемном устройстве колебания несущей частоты создаются местным генератором малой мощности и накладываются на принятые антенной колебания боковых частот. Передача боковой полосы частот без несущей частоты приводит к повышению громкости приема и сокращению расхода электроэнергии, потребляемой передатчиком.

ются в резонанс на частоту колебаний принимаемого передатчика. Благодаря этому в приемнике из колебаний всех работающих передатчиков выделяются только те, которые создаются принимаемым передатчиком. К передачам станций, работающих на других частотах, приемник практически нечувствителен. Детектор преобразует принятые колебания в токи, изменяющиеся подобно токам, с которыми производилось управление параметрами колебаний высокой частоты в передатчике.

При телеграфной передаче ток высокой частоты преобразуется детектором в импульсы постоянной тока или тока звуковой частоты. В случае телефонной передачи на выходе детектора протекают токи звуковых частот. Колебания высокой частоты до детектирования и колебания после детектирования в большинстве приемных устройств подвергаются усилению.

На выходе приемника токи воздействуют на телеграфный аппарат либо на телефон или громкоговоритель. В некоторых случаях ток на выходе приемника воздействует на специальную аппаратуру. Например, при передаче по радио с пункта взрыва на сейсмостанцию отметок времени взрыва этот ток приводит в действие шлейф сейсмического осциллографа.

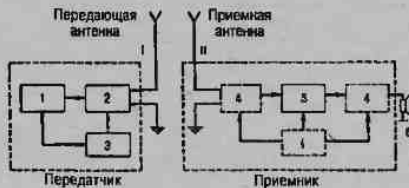


Рис. 90. Схема радиосвязи