

Министерство образования и науки Российской Федерации
Муромский институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(МИ ВлГУ)

Отделение среднего профессионального образования

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

для студентов специальности

11.02.01 Радиоаппаратостроение

Программа подготовки специалистов среднего звена

Составитель
Жиганова Е.А.

Муром 2018

Содержание

Лабораторная работа №1. Исследование разветвленных цепей постоянного и переменного тока	3
Лабораторная работа №2. Экспериментальная проверка основных законов электрических цепей	7
Лабораторная работа №3. Исследование частотных характеристик параллельного колебательного контура	10
Лабораторная работа №4. Исследование частотных характеристик последовательного колебательного контура	18
Лабораторная работа №5. Исследование цепей с взаимной индуктивностью	23
Лабораторная работа №6. Экспериментальное определение А-параметров четырехполюсника	31
Лабораторная работа №7. Исследование трехфазного асинхронного двигателя	38
Лабораторная работа №8. Исследование линейных цепей в переходном режиме	46
Лабораторная работа №9. Исследование цепей с распределенными параметрами	53
Лабораторная работа №10. Исследование двигателя постоянного тока	56
Библиографический список рекомендуемых источников	71

Лабораторная работа №1.

Исследование разветвленных цепей постоянного и переменного тока

Цель работы: Определение входных и взаимных проводимостей цепи. Проверка теоремы об активном двухполюснике. Построение потенциальной диаграммы.

Входные и взаимные проводимости

В соответствии с принципом наложения ток в любой ветви может быть предоставлен в виде суммы токов:

$$I_k = E_1 g_{k1} + E_2 g_{k2} + \dots + E_k g_{kk} + \dots + E_p g_{kp},$$

где $E_1 g_{k1}$ – составляющая тока в k -ой ветви, обусловленная эдс E_1 ; $E_2 g_{k2}$ – составляющая тока в k -ой ветви, обусловленная эдс E_2 и т.д.; g_{kk} – входная проводимость; $g_{k1}, g_{k2}, \dots, g_{kp}$ – взаимные проводимости.

Входную и взаимную проводимости можно определить из опыта. Например, если в цепи оставить эдс E_1 и измерить токи во всех ветвях, то входную и взаимную проводимости цепи можно найти из выражений:

$$g_{11} = \frac{I'_1}{E_1}, g_{21} = \frac{I'_2}{E_1}, g_{31} = \frac{I'_3}{E_1}, \dots, g_{k1} = \frac{I'_k}{E_1}, \dots$$

Аналогично, оставляя в цепи только эдс E_2 , найдем

$$g_{22} = \frac{I''_2}{E_2}, g_{12} = \frac{I''_1}{E_2}, g_{32} = \frac{I''_3}{E_2}, \dots, g_{k2} = \frac{I''_k}{E_2}, \dots$$

На основании принципа взаимности должно выполняться:

$$g_{12} = g_{21}, g_{13} = g_{31}, \dots, g_{k1} = g_{1k}.$$

Линейные соотношения в электрической цепи

Линейные соотношения между токами и напряжениями выражаются в том, что при изменении сопротивления или эдс в какой-либо ветви связь между токами и напряжениями других ветвей можно представить в виде линейных соотношений $Y = a + bx$, где a и b – некоторые постоянные коэффициенты; x и y – напряжение или ток (ток или напряжение) двух любых ветвей.

Например, зависимость тока I_1 от тока I_3 будет иметь вид: $I_1 = a + bI_3$.

Проводя опыт холостого хода и короткого замыкания можно определить коэффициенты a и b .

При холостом ходе (размыкание ветви) $I_3=0$, а $I_{1x}=a$.

При коротком замыкании ветви $I_{1к} = I_{1x} + bI_{3к}$, следовательно,

$$b = \frac{I_{1к} - I_{1x}}{I_{3к}}.$$

Активный двухполюсник

Двухполюсником называют электрическую цепь, имеющую два зажима (рисунки 2.1 и 2.2), которыми она присоединяется к остальной части цепи.

Ток в нагрузке R_n можно определить из выражения $I = \frac{E_0}{R_0 + R_n}$.

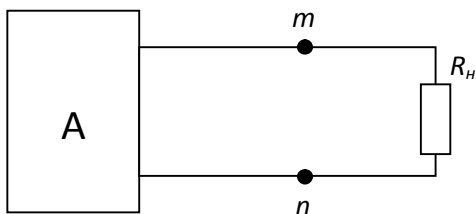


Рисунок 2.1. – Схема выходной цепи двухполюсника

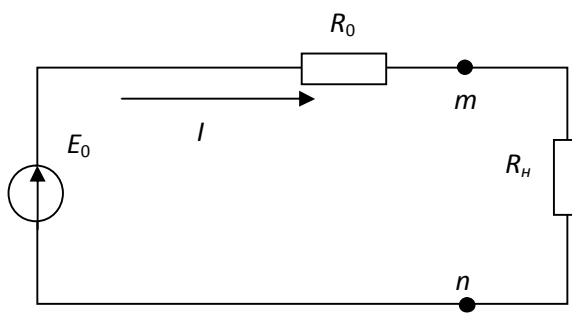


Рисунок 2.2. – Схема входной и выходной цепей двухполюсника

Мощность, развиваемая активным двухполюсником $P_1 = E_0 I$.

Мощность, выделяемая в нагрузке, $P_2 = I^2 R_n$. Наибольшая мощность в нагрузке будет выделяться при $R_n = R_0$. ЭДС E_0 и внутреннее сопротивление R_0 активного двухполюсника можно определить из опыта.

Размыкая ветвь mn и измеряя напряжение на зажимах U_{mn} , найдем значение E_0 активного двухполюсника. Замыкая ветвь mn накоротко ($R_n=0$) и определяя величину тока $I_{mnк}$, можно определить R_0 – внутреннее сопротивление активного двухполюсника:

$$R_0 = \frac{U_{mn}}{I_{mnк}} = \frac{E_0}{I_{mnк}}.$$

Потенциальная диаграмма

Распределение потенциалов в электрической схеме можно наглядно представить с помощью потенциальной диаграммы. Потенциальная диаграмма строится в прямоугольных осях координат. По оси абсцисс на диаграмме откладываются в масштабе сопротивления в том порядке, в какой они следуют в цепи при обходе контура, а по оси ординат – потенциалы соответствующих точек выбранного контура.

Рассмотрим схему цепи (рисунок 2.3).

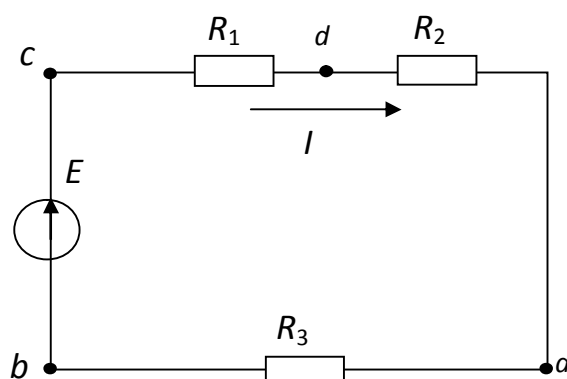


Рисунок 2.3. – Схема одноконтурной цепи

Зная величину тока I в цепи, определим потенциал каждой точки. Потенциал точки a примем равным нулю, $\varphi_a = 0$. Тогда

$$\varphi_b = \varphi_a - IR_3 = -IR_3,$$

$$\varphi_c = \varphi_b + E = E - IR_3,$$

$$\varphi_d = \varphi_c - IR_1 = E - I(R_1 + R_3),$$

$$\varphi_a = \varphi_d - IR_2 = E - I(R_1 + R_2 + R_3) = 0.$$

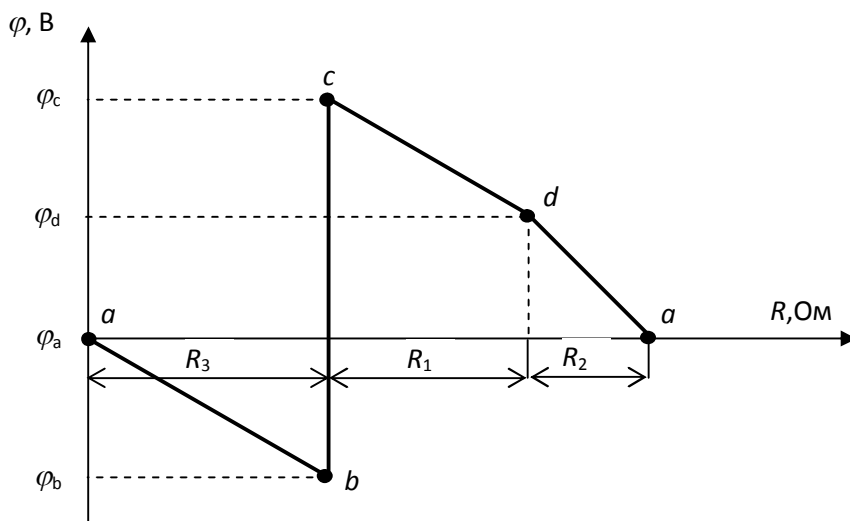


Рисунок 2.4. – Потенциальная диаграмма для цепи рисунка 2.3

Предварительный расчет

1. Рассчитать входные и взаимные проводимости ветвей.
2. Найти коэффициенты линейного соотношения:

$$I_i = a + bI_{i+1}, \text{ где } i - \text{номер варианта.}$$

3. Рассчитать относительно зажимов mn напряжение

$$U_{mn} = E_0 \text{ и } R_{mn} = R_0.$$

4. Рассчитать и построить потенциальную диаграмму для контуров $abcmnd$ (включены обе эдс) и $bcnd$ (контур без эдс).

Лабораторное задание

1. Согласно варианту собрать цепь для исследования. Измерить токи во всех ветвях от действия каждой эдс и вычислить входные и взаимные проводимости.
2. Найти из опыта коэффициенты a и b линейного соотношения.
3. Определить напряжение U_{mn} и сопротивление R_{mn} опытным путем. Эдс должна быть отключена (E_2).
4. Измерить потенциалы точек a, b, c, d, m, n и построить потенциальную диаграмму контуров $abcmnd$ и $bcnd$.
5. Результаты эксперимента сравнить с расчетами.

Лабораторная работа №2. Экспериментальная проверка основных законов электрических цепей

Цель работы: экспериментальная проверка законов Ома и Кирхгофа.

Рассмотрим схему цепи (рисунок 1.1).

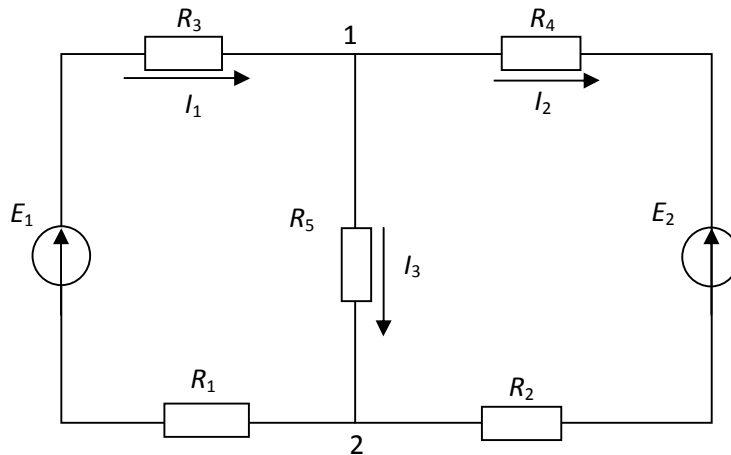


Рисунок 1.1. – Схема двухконтурной цепи

Данная схема содержит: узлов $q = 2$, ветвей $p = 3$.

По первому закону Кирхгофа для узла 1 составим уравнение $I_1 = I_2 + I_3$.

По второму закону Кирхгофа составим два уравнения для двух независимых контуров:

$$R_1 I_1 + R_3 I_1 + R_5 I_3 = E_1,$$

$$R_4 I_2 + R_2 I_2 - R_5 I_3 = -E_2.$$

Получим систему уравнений с тремя неизвестными относительно токов I_1, I_2, I_3 :

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0, \\ (R_1 + R_3)I_1 + R_5 I_3 = E_1, \\ (R_1 + R_4)I_2 - R_5 I_3 = -E_2. \end{cases}$$

Для указанной полярности источников и направлений токов в ветвях получим

$$I_1 = \frac{E_1(R_2 + R_4 - R_5) - E_2 R_5}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4 + R_5) + R_5(R_2 + R_4)},$$

$$I_2 = \frac{E_1 R_5 - E_2(R_1 + R_3 + R_5)}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4 + R_5) + R_5(R_2 + R_4)},$$

$$I_3 = \frac{E_1(R_2 + R_4) + E_2(R_1 + R_3)}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4 + R_5) + R_5(R_2 + R_4)}.$$

Потенциал узла 2 $\varphi_2 = 0$. По методу узловых напряжений определим потенциал узла 1.

$$\varphi = \frac{E_1 \frac{1}{R_1 + R_3} + E_2 \frac{1}{R_2 + R_4}}{\frac{1}{R_1 + R_3} + \frac{1}{R_2 + R_4} + \frac{1}{R_5}}.$$

Напряжение между узлами 1 и 2

$$U_{12} = \frac{E_1 \frac{1}{R_1 + R_3} + E_2 \frac{1}{R_2 + R_4}}{\frac{1}{R_1 + R_3} + \frac{1}{R_2 + R_4} + \frac{1}{R_5}}.$$

Тогда ток I_3 будет определен $I_3 = \frac{U_{12}}{R_5}$.

Предварительный расчет

1. Рассчитать токи в ветвях (I_1 , I_2 , I_3), падения напряжений в ветвях. Проверить баланс мощностей.

2. Рассчитать напряжение U_{12} и ток I_3 , пользуясь методом узловых напряжений.

3. Провести расчеты по п.1 и 2, если полярность источника E_2 изменена на обратную.

Результаты расчетов занести в таблицу.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (рисунок 1.2). Включить тумблеры B_1 и B_2 . Измерить токи в ветвях. Если стрелка приборов отклоняется в противоположную сторону, то следует поменять местами концы прибора. Результаты измерений занести в таблицу.

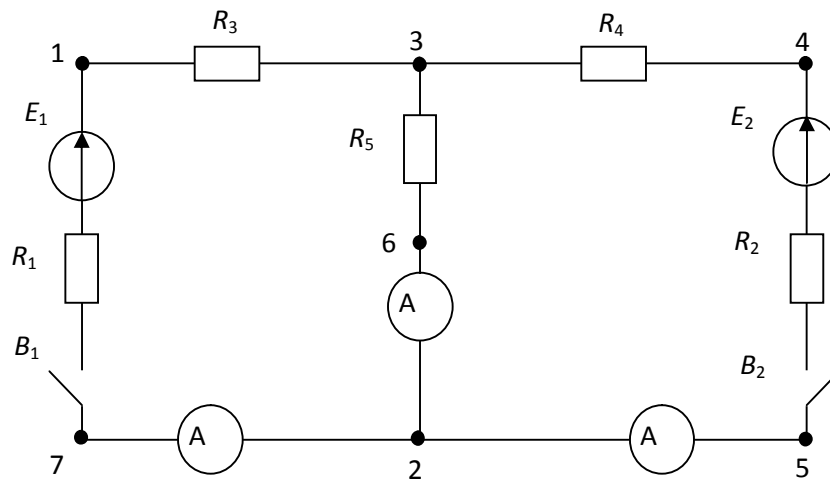


Рисунок 1.2. – Схема исследуемой цепи

2. Измерить падение напряжений на резисторах $R_3 R_4 R_5$, а также между точкой 2 и точками 1, 3, 4, 5, 6, 7. Результаты измерений занести в таблицу с учетом полярности падения напряжений.

3. Изменить полярность источника E_2 на обратную. Измерить все токи и падения напряжений.

4. Сравнить результаты экспериментов с результатами, полученными при предварительном расчете. Сделать выводы.

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать падение напряжений на внутренних сопротивлениях источников R_1 и R_2 для всех экспериментов.

2. Проверить первый закон Кирхгофа для каждого узла и второй закон Кирхгофа для каждого контура.

3. Проверить баланс мощностей.

4. Построить потенциальную диаграмму для внешнего контура схемы.

Лабораторная работа №3.
Исследование частотных характеристик
параллельного колебательного контура

Цель работы: исследование резонансных свойств параллельного колебательного контура при воздействии гармонического напряжения.

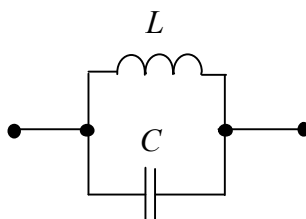


Рисунок 5.1

Если индуктивность L и емкость C соединены параллельно (рисунок 5.1), то при увеличении частоты ω реактивное сопротивление индуктивной ветви X_L растёт, а ёмкостное X_C уменьшается. Реактивные проводимости ветвей b_L и b_C ведут себя обратным образом: с увеличением частоты b_L уменьшается, а b_C растёт:

$$b_L = \frac{1}{\omega L}; \quad b_C = \omega C.$$

Реактивная проводимость цепи определяется из выражения

$$b = b_L - b_C = \frac{1}{\omega L} - \omega C.$$

При низких частотах индуктивная проводимость b_L больше ёмкостной проводимости b_C и цепь носит индуктивный характер. По мере увеличения частоты ω индуктивная проводимость уменьшается, а ёмкостная растёт. Частота, при которой реактивные проводимости b_L и b_C равны по абсолютной величине, называется резонансной частотой и обозначается ω_0 . При увеличении частоты ёмкостная проводимость становится больше индуктивной и цепь приобретает ёмкостной характер. Общее сопротивление контура Z_{ω} определяется как величина, обратная проводимости цепи. При $\omega = 0$ $b_L \rightarrow \infty$, $b \rightarrow \infty$, $Z_{\omega} = 0$. При $\omega = \omega_0$ $b = 0$, $Z_{\omega} = Z_{\omega p} \rightarrow \infty$.

При $\omega \rightarrow \infty$ $b_C \rightarrow \infty$, $b \rightarrow \infty$, $Z_{\omega} = 0$.

Эквивалентное сопротивление Z_{\circ} имеет индуктивный характер в диапазоне частот от $\omega_0=0$ до $\omega=\omega_0$, и емкостной характер в диапазоне частот от $\omega=\omega_0$ до $\omega \rightarrow \infty$. При резонансной частоте ω_0 идеальный контур имеет бесконечно большое сопротивление.

Пусть параллельный колебательный контур подключен к генератору с внутренним сопротивлением R_i (рисунок 5.2).

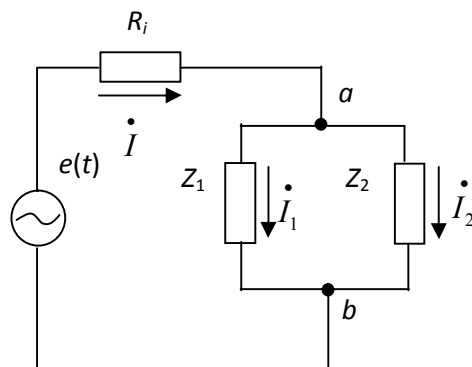


Рисунок 5.2. – Эквивалентная схема параллельного контура

Каждая из ветвей контура может содержать индуктивности и емкости: X_1 и X_2 обозначают результирующие реактивные сопротивления первой и второй ветви, r_1 и r_2 – активные сопротивления.

Условием резонанса токов является равенство абсолютных значений реактивных проводимостей обеих ветвей контура при противоположном их характере. Одна из ветвей контура должна иметь характер индуктивного сопротивления, вторая – емкостного.

Полное сопротивление ветвей $Z_1 = r_1 + jX_1$, $Z_2 = r_2 + jX_2$.

Сопротивление контура

$$Z_{\circ} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(r_1 + jX_1)(r_2 + jX_2)}{(r_1 + r_2) + j(X_1 + X_2)}.$$

Условие резонанса токов $\frac{|X_1|}{r_1^2 + X_1^2} = \frac{|X_2|}{r_2^2 + X_2^2}$.

При выполнении этого условия полная проводимость контура между точками ab , имеющая чисто активный характер, равна

$$\frac{1}{Z_{\circ p}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = \frac{r_1}{r_1^2 + X_1^2} + \frac{r_2}{r_2^2 + X_2^2},$$

а сопротивление между точками ab равно

$$\frac{1}{Z_{\text{эп}}} = \frac{(r_1^2 + X_1^2)(r_2^2 + X_2^2)}{r_1(r_1^2 + X_1^2) + r_2(r_2^2 + X_2^2)}.$$

Для обозначения модуля резонансного сопротивления применяется символ $R_{0\text{е}}$. В большинстве случаев выполняется условие $r_1 \ll |X_1|$, $r_2 \ll |X_2|$. Поэтому условие резонанса токов можно записать $|X_1| = |X_2|$, $X_1 + X_2 = 0$.

Для контура с малыми потерями при резонансе токов полное реактивное сопротивление контура при последовательном обходе его элементов должно равняться нулю.

В случае высокой добротности резонансные частоты для параллельного и последовательного контуров одинаковы и определяются выражением

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

При выполнении условий $r_1 \ll |X_1|$, $r_2 \ll |X_2|$ выражение для $Z_{\text{эп}}$ можно упростить

$$Z_{\text{эп}} = \frac{X_1^2 X_2^2}{r_1 X_1^2 + r_2 X_2^2} \approx \frac{X_1^2}{r_1 + r_2} = \frac{X_2^2}{r_1 + r_2}.$$

Обозначив сумму активных сопротивлений ветвей через $r = r_1 + r_2$, получим $Z_{\text{эп}} = R_{0\text{е}} = \frac{X_1^2}{r} = \frac{X_2^2}{r}$.

Рассмотрим разновидности схем параллельных контуров. Активные сопротивления r_1 , r_2 учитывают потери в катушке и конденсаторе.

Контур I вида (рисунок 5.3)

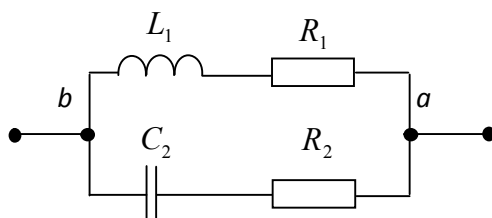


Рисунок 5.3. – Схема параллельного контура I вида

В данном случае имеем $X_1 = \omega_0 L$, $X_2 = -\frac{1}{\omega_0 C}$, $r = r_1 + r_2$,

$$R_{oe} = \frac{\omega_0^2 L^2}{r} = \frac{1}{\omega_0^2 C^2 r} = \frac{L}{Cr} = -\frac{\rho^2}{r}.$$

Учитывая, что добротность контура $Q = \frac{\rho}{r}$, для резонансного сопротивления контура имеем $R_{oe} = \rho Q$.

Контур II вида (рисунок 5.4)

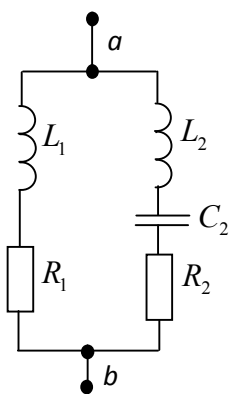


Рисунок 5.4. - Схема параллельного контура II вида

В данном случае вторая ветвь кроме конденсатора содержит еще и индуктивность. Реактивные сопротивления ветвей

$$X_1 = \omega_0 L_1, \quad X_2 = \omega_0 L_2 - \frac{1}{\omega_0 C}.$$

$$\text{Резонансное сопротивление } R_{oe} = \frac{(\omega_0 L_1)^2}{r} = \frac{\left(\omega_0 L_2 - \frac{1}{\omega_0 C} \right)^2}{r}.$$

Резонансная частота определяется из условий $X_1 = -X_2$, $X_1 + X_2 = 0$,

$$\omega_0 L_1 + \omega_0 L_2 - \frac{1}{\omega_0 C} = 0 \quad \text{и равна} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_2)C}} = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

где $L = L_1 + L_2$, обозначим через p отношение $p = \frac{L_1}{L_1 + L_2} = \frac{L_1}{L}$. Тогда получаем:

$$X_1 = \omega_0 L_1 = p \omega_0 L = p \rho; \quad R_{oe} = p^2 \frac{\rho^2}{r} = p^2 \rho Q.$$

Коэффициент p , определяющий степень связи контура с внешней цепью, называется *коэффициентом включения контура*. Если L_1 и L_2 связаны между собой взаимной индукцией M (представляют собой две части одной катушки), то коэффициент включения определяется формулой

$$p = \frac{L_1 \pm M}{L_1 + L_2 \pm M}.$$

Знак (+) берется при согласных направлениях магнитных потоков катушек L_1 и L_2 , а знак (-) – при встречных.

Контур III вида (рисунок 5.5)

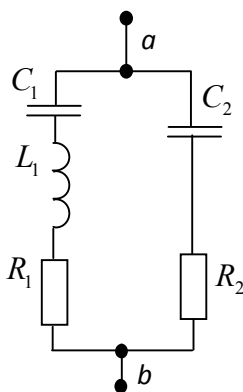


Рисунок 5.5.- Схема параллельного контура III вида

Реактивное сопротивление ветвей $X_1 = \omega_0 L_1 - \frac{1}{\omega_0 C_1}$, $X_2 = -\frac{1}{\omega C_2}$.

Резонансное сопротивление $R_{oe} = \frac{X_2^2}{r} = \frac{1}{\omega_0^2 C_2^2 r}$. Резонансная частота контура

определяется выражением $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Введем коэффициент включения $p = \frac{C}{C_2}$, тогда

$$R_{oe} = \left(\frac{C}{C_2} \right)^2 \frac{L}{Cr} = p^2 \frac{\rho^2}{r} = p^2 \rho Q.$$

Резонансная кривая и фазовая характеристика. Полоса пропускания.

Рассмотрим сопротивление контура при любых частотах.

Если $r_1 \ll |X_1|$, $r_2 \ll |X_2|$, то полное реактивное сопротивление контура, получаемое при последовательном его обходе $X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = X_1 + X_2$.

Тогда $Z_{\circ} = \frac{-X_1 X_2}{r + j(X_1 + X_2)} = -\frac{X_1 X_2}{r + jX}$. Кроме того,

$$r + jX = r \left(1 + j \frac{X}{r} \right) = r \left(1 + j \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} Q \right) = r(1 + ja).$$

Отсюда $Z_{\circ} = \frac{R_{oe}}{1 + ja}$, $a = \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} Q$ - обобщенная расстройка.

Последнее выражение можно использовать для выявления частотных свойств параллельного контура. Амплитуда напряжения на контуре

$$U_a = I Z_{\circ} = I \frac{R_{oe}}{\sqrt{1 + a^2}} = \frac{U_{ap}}{\sqrt{1 + a^2}},$$

где $U_{ap} = I R_{oe}$ - напряжение при резонансе.

А уравнение резонансной кривой напряжения и фазовой характеристики имеет вид:

$$n = \frac{U_a(\omega)}{U_a(\omega_0)} = \frac{U_a(\omega)}{U_{ap}} = \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}},$$

$$\varphi(a) = \arctga = \arctg \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} Q.$$

В реальных устройствах необходимо считаться с зависимостью тока от величины нагрузочного сопротивления Z_{\circ} .

Рассмотрим влияние внутреннего сопротивления генератора R_i на полосу пропускания контура.

Ток в цепи $\dot{I} = \frac{\dot{E}}{R_i + Z_{\circ}}$. Амплитуда напряжения на контуре

$$U_a = \dot{I} Z_{\circ} = \dot{E} \frac{Z_{\circ}}{R_i + Z_{\circ}},$$

А при резонансе $\dot{U}_{ap} = \dot{E} \frac{R_{oe}}{R_i + R_{oe}}$. Учитывая, что $Z_{\circ} = \frac{R_{oe}}{(1 + ja)}$, получим

$$\frac{\dot{U}_a}{\dot{U}_{ap}} = \frac{R_i + R_{oe}}{(1 + ja)R_i + R_{oe}} = \frac{1}{1 + j \frac{a}{1 + R_{oe}/R_i}}.$$

Резонансная кривая имеет вид:

$$n = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{a}{1 + R_{oe}/R_i} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \cdot \frac{Q}{1 + R_{oe}/R_i} \right)^2}}$$

Из этой формулы видно, что генератор, обладающий конечным внутренним сопротивлением, оказывает на контур шунтирующее действие, притупляя его резонансную кривую.

Эквивалентная добротность шунтированного контура $Q_3 = \frac{Q}{1 + R_{oe}/R_i}$

снижается тем сильнее, чем больше отношение R_{oe}/R_i . Это необходимо учитывать при определении полосы пропускания параллельного контура. Если для «холостого» параллельного контура полоса пропускания, определяемая по снижению U до значения $1/\sqrt{2}$, равна, как и в случае последовательного контура $2\Delta\omega_0 = \frac{\omega_0}{Q}$, то с учетом шунтирующего действия

генератора полоса пропускания будет $2\Delta\omega_0 = \frac{\omega_0}{Q_3}$.

Предварительное задание

1. Рассчитать частоту параллельного резонанса контура $\omega_0 = (f_0)$.
2. Рассчитать частоту последовательного резонанса контура $\omega_0' = (f_0')$.
3. Рассчитать коэффициент включения контура.
4. Определить добротность «холостого» контура Q и добротность Q_3 шунтируемого контура ($R_i=1000$ кОм).
5. Рассчитать и построить резонансную кривую контура. Определить полосу пропускания контура.
6. Рассчитать и построить фазовую характеристику контура.

Лабораторное задание

1. Собрать схему контура I вида. Настроить его на резонансную частоту f_0 и снять резонансную кривую напряжения.
2. Построить резонансную кривую напряжения на контуре. Определить полосу пропускания.
3. Собрать схему контура II вида. Настроить контур на резонансную частоту f_0 и снять резонансную кривую напряжения.
4. Построить резонансную кривую напряжения контура II вида. Определить полосу пропускания контура.
5. Определить частоту последовательного резонанса контура.

Лабораторная работа №4. Исследование частотных характеристик последовательного колебательного контура

Цель работы: исследовать свойства последовательного колебательного контура при воздействии на цепь напряжения синусоидальной формы.

В последовательной цепи r, L, C (рисунок. 4.1) при изменении частоты ω активное сопротивление r считается неизменным, индуктивное сопротивление X_L изменяется пропорционально частоте, а емкостное сопротивление X_C – обратно пропорционально частоте (рисунок 4.2):

$$X_L = \omega L = 2\pi fL; \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}.$$

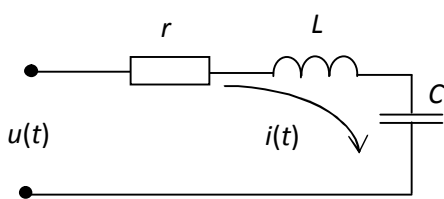


Рисунок 4.1.- Схема последовательного контура

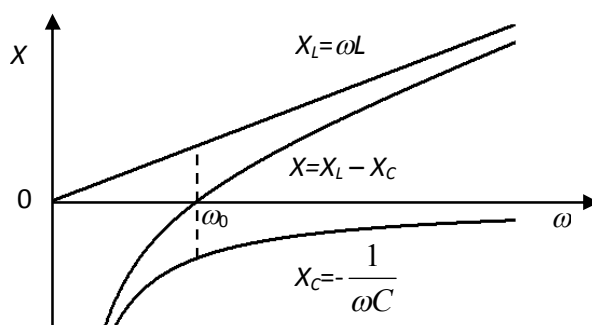


Рисунок 4.2. – Частотные характеристики индуктивного и емкостного сопротивлений

Реактивное сопротивление цепи определяется выражением

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

При малых частотах индуктивное сопротивление X_L мало, а емкостное X_C велико, поэтому реактивное сопротивление X имеет емкостной характер. По мере увеличения частоты ω индуктивное сопротивление X_L растет, а емкостное X_C – уменьшается.

При некоторой частоте ω_0 X_L, X_C оказываются равными и реактивное сопротивление цепи $X=0$. Частота, при которой $X_L = X_C$, называется *резонансной*. Резонансная частота последовательного контура определяется из выражения

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{или} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}.$$

Полное сопротивление цепи определяется выражением

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Определим ток I в цепи при постоянном напряжении U в зависимости от ω

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

Отсюда видно, что при $f=0$ $\frac{1}{\omega C} \rightarrow \infty$, $z \rightarrow \infty$, $I = 0$.

При $\omega = \omega_0$ $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$, $I = I_0 = \frac{U}{r}$ где I_0 – ток в цепи при резонансе.

Таким образом, при последовательном резонансе ток в цепи резко возрастает, поскольку полное сопротивление цепи $z_0=r$.

При $f \rightarrow \infty$ $X_L \rightarrow \infty$, поэтому $z \rightarrow \infty$, $I = 0$.

Добротностью контура называется безразмерная величина, показывающая отношение реактивного сопротивления одного из реактивных элементов при резонансе к активному сопротивлению всей цепи

$$Q = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 r C}.$$

Если вместо ω_0 подставить выражение $\frac{1}{\sqrt{LC}}$, то добротность контура можно определить

$$Q = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Выражение $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$, показывающее сопротивление одного из реактивных элементов цепи при резонансе, называется *характеристическим сопротивлением* контура $\rho = X_{0L} = X_{0C} = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$. Тогда

добротность $Q = \frac{\rho}{r}$.

Величина обратная добротности, называется *затуханием* контура $d = \frac{1}{Q}$

Преобразуем выражение для тока

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + X^2}} = \frac{U}{r\sqrt{1 + \left(\frac{X}{r}\right)^2}} = \frac{I_0}{\sqrt{1 + \left(Q\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right)^2}}.$$

Выражение $a = Q\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)$ называется *обобщенной расстройкой*.

Таким образом, ток I при любой частоте определяется $I = I_0 \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}}$, фазовый угол φ между напряжением, приложенным в цепи и током в цепи, определяется из выражения

$$\varphi = \arctg\left[Q\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right] = \arctg(a).$$

При $\omega < \omega_0$ $a < 0$, поэтому φ величина отрицательная, что соответствует емкостному характеру цепи. При $\omega = \omega_0$ $a = 0$, $\varphi = 0$, что соответствует чисто активной цепи.

Кривая $I(\omega)$ называется *резонансной кривой контура*. Строго говоря, кривые $I(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ не являются симметричными кривыми. Определим закон изменения напряжения на емкости в зависимости от частоты.

$$\text{Модуль напряжения на конденсаторе } U_c = UQ \frac{\omega_0}{\omega} \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}}.$$

При резонансе $\frac{\omega}{\omega_0} = 1$, $a = 0$, то $U_{oc} = UQ$. Таким образом, при резонансе напряжение на конденсаторе в Q раз больше, чем напряжение источника питания U . Строго говоря, напряжение на конденсаторе максимально не при резонансной частоте, а при несколько меньшей частоте

$$\omega_{C\max} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}$$

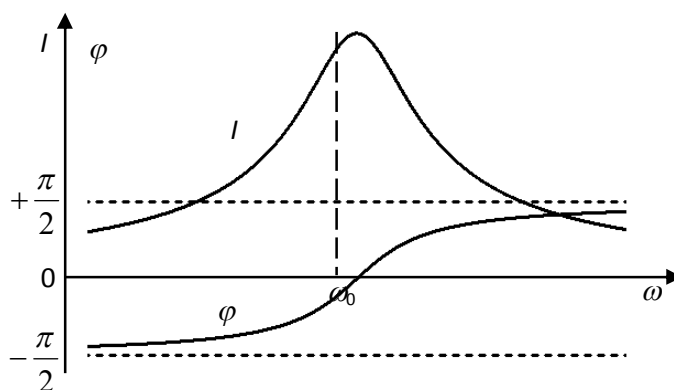


Рисунок 4.3. – Резонансные кривые последовательного контура

Модуль напряжения на индуктивности при любой частоте

$$U_c = UQ \frac{\omega_0}{\omega} \frac{1}{\sqrt{1+a^2}}.$$

Для определения диапазона частот, пропускаемых контуром, вводится понятие «полоса пропускания контура».

Полосой пропускания называется диапазон частот, на границе которого ордината резонансной кривой уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с ординатой на резонансной частоте.

Абсолютное значение полосы пропускания (рисунок 4.4) $2\Delta f_0 = f_2 - f_1$.

Аналитически частоты на границе полосы пропускания f_1 и f_2

$$f_1 = \frac{f_0}{2Q} \left(-1 + \sqrt{1 + 4Q^2} \right), \quad f_2 = \frac{f_0}{2Q} \left(1 + \sqrt{1 + 4Q^2} \right)$$

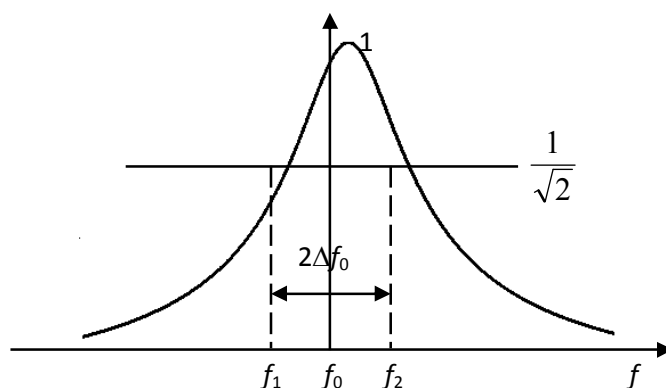


Рисунок 4.4. – Определение полосы пропускания

Рассмотрим выражение $2 = 1 + Q^2 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^2$ или $Q^2 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^2 = 1$,

$$a^2 = 1, \quad a = \pm 1.$$

Таким образом, обращенная расстройка на границах полосы пропускания равна по модулю единице $|a|=1$.

Предварительный расчет

1. Согласно варианту рассчитать: ω_0 и f_0 – резонансную частоту контура: R_0 -добавочное сопротивление резистора для получения цепи с заданной добротностью: ω_1, ω_2 и f_1, f_2 – граничные частоты полосы пропускания.

2. Рассчитать и построить в масштабе резонансные кривые тока, напряжения на конденсаторе, напряжение на катушке индуктивности в зависимости от частоты.

Лабораторное задание

1. Собрать схему исследуемой цепи.
2. Снять резонансные кривые тока и напряжения.
3. Построить резонансные кривые на одном графике с расчетными.
4. Определить полосу пропускания и граничные частоты полосы пропускания по данным п.2.

Лабораторная работа №5. Исследование цепей с взаимной индуктивностью

Цель работы: исследование резонансных свойств связанных систем при воздействии напряжения синусоидальной формы.

Два контура называются связанными (рисунок 6.1), если изменение тока в одном из них вызывает изменение напряжения или тока в другом.

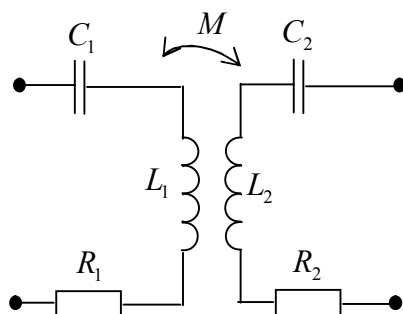


Рисунок 6.1. - Схема системы связанных контуров

Связь между контурами обеспечивается через общий магнитный поток.

Для выявления резонансных свойств системы из двух связанных контуров удобно исходить из условия, что амплитуда напряжения синусоидальной эдс, вводимой в первый контур, поддерживается неизменной, а частота ω этой эдс может изменяться.

Рассмотрим обобщенную схему двухконтурной системы (рисунок 6.2).

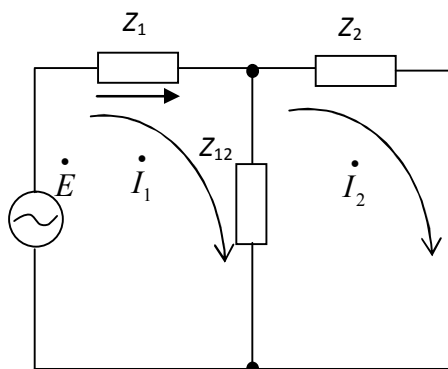


Рисунок 6.2. – Эквивалентная схема системы связанных контуров

Результирующие величины индуктивности, емкости и сопротивления, получаемые при обходе данного контура и при разомкнутом втором контуре, обозначим через L_{11} , C_{11} , r_{11} ; L_{22} , C_{22} , r_{22} .

Комплексные сопротивления подобного контура при частоте определяются выражениями

$$\begin{aligned} Z_{11} &= j\omega L_{11} + r_{11} + \frac{1}{j\omega C_{11}}; \\ Z_{22} &= j\omega L_{22} + r_{22} + \frac{1}{j\omega C_{22}}. \end{aligned}$$

Сопротивление цепи, общей для двух контуров $Z_{12} = j\omega L_{12} + r_{12} + \frac{1}{j\omega C_{12}}$ называется *сопротивлением связи*. Тогда $Z_{11} = Z_1 + Z_{12}$; $Z_{22} = Z_2 + Z_{12}$.

Если связь между контурами осуществляется через взаимную индукцию M , то сопротивление связи $Z_{12} = j\omega M$.

Для количественной оценки взаимного влияния контуров вводится коэффициент связи $K = \frac{M}{\sqrt{L_{11}L_{22}}}$.

Система уравнений для связанных контуров

Из обобщенной схемы имеем систему уравнений

$$\begin{cases} Z_{11} \dot{I}_1 - Z_{12} \dot{I}_2 = \dot{E}, \\ -Z_{12} \dot{I}_1 + Z_{22} \dot{I}_2 = 0. \end{cases}$$

Решая систему уравнений для токов, имеем выражения

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{E}}{Z_{11} - \frac{Z_{12}^2}{Z_{22}}}; \\ \dot{I}_2 &= \frac{\dot{E}}{Z_{11} - \frac{Z_{12}^2}{Z_{22}}} \frac{Z_{12}}{Z_{22}} = \dot{I}_1 \frac{Z_{12}}{Z_{22}}. \end{aligned}$$

Для систем с чисто магнитной связью $Z_{12}^2 = (jX_{12})^2 = -X_{12}^2$. Выражение для токов будут иметь вид:

$$I_1 = \frac{\dot{E}}{Z_{11} + \frac{X_{12}^2}{Z_{22}}};$$

$$\dot{I}_2 = \frac{E}{Z_{11} + \frac{X_{12}^2}{Z_{22}}} \cdot \frac{jX_{12}}{Z_{22}}.$$

Из данных выражений видно, что под влиянием связи со вторым контуром полное сопротивление первого контура возрастает на величину $Z_{\text{вн}} = \frac{X_{12}^2}{Z_{22}}$. Это сопротивление, в общем случае комплексное, называется

вносимым в первый контур сопротивлением.

Рассмотрим выражение $Z_{\text{вн}}$ с учетом

$$Z_{22} = r_{22} + j\left(\omega L_{22} - \frac{1}{\omega C_{22}}\right) = r_{22} + jX_{22}.$$

$$\text{Тогда } Z_{\text{вн}} = r_{22} \frac{X_{12}^2}{Z_{22}^2} - jX_{22} \frac{X_{12}^2}{Z_{22}^2}.$$

Действительная часть этого выражения определяет приращение активного сопротивления первого контура, а мнимая учитывает реактивное сопротивление вносимое вторым контуром в первый.

$$\text{Введем обозначения } r_{\text{вн}} = \frac{X_{12}^2}{Z_{22}^2} r_{22}; \quad X_{\text{вн}} = -\frac{X_{12}^2}{Z_{22}^2} X_{22}.$$

$$\text{При индуктивной связи будем иметь } r_{\text{вн}} = r_{22} \frac{\omega^2 M^2}{Z_{22}^2}; \quad X_{\text{вн}} = -\frac{\omega^2 M^2}{Z_{22}^2} X_{22}.$$

Независимо от связи и от настройки второго контура активное вносимое сопротивление всегда положительно.

В зависимости от настройки второго контура реактивная часть вносимого в первый контур сопротивления может быть как положительной так и отрицательной.

Если резонансная частота второго контура

$$\omega_{02} > \omega, \text{ то } X_{22} = \omega L_{22} - \frac{1}{\omega C_{22}} < 0 \text{ и } X_{\text{вн}} > 0.$$

Если $\omega_{02} < \omega$, то $X_{22} > 0$ и $X_{\text{вн}} < 0$. Это означает, что при емкостной расстройке второго контура в первый вносится индуктивное сопротивление, а при индуктивной расстройке - емкостное сопротивление.

Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристика

Считая амплитуду эдс генератора неизменной, найдем уравнение для токов I_1, I_2 в зависимости от частоты.

Рассмотрим сопротивления контуров

$$\begin{aligned} Z_{11} &= r_{11} + jX_{11} \approx r_{11}(1 + ja_1); \\ Z_{22} &= r_{22} + jX_{22} \approx r_{22}(1 + ja_2), \end{aligned}$$

где a_1 и a_2 - обобщенные расстройки контуров.

Тогда выражение токов будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{E}}{r_{11}} \frac{1 + ja_2}{1 - a_1a_2 - \frac{X_{12}^2}{r_{11}r_{22}} + j(a_1 + a_2)}; \\ \dot{I}_2 &= \frac{\dot{E}}{\sqrt{r_{11}r_{22}}} \frac{1}{1 - a_1a_2 + \frac{X_{12}^2}{r_{11}r_{22}} + j(a_1 + a_2) + \frac{jX_{12}}{\sqrt{r_{11}r_{22}}}}. \end{aligned}$$

Рассмотрим выражение:

$$\frac{X_{12}^2}{r_{11}r_{22}} = \frac{X_{12}^2}{\rho_1\rho_2} \frac{\rho_1}{r_{11}} \frac{\rho_2}{r_{22}} = K^2 Q_1 Q_2 = \frac{k^2}{d_1 d_2} = A^2 \text{ и назовем } A - \text{фактором связи.}$$

Уравнение для токов можно переписать

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= 2(I_{1\text{max}})_{X_{12\text{ннм}}} \frac{\sqrt{1 + a_2^2} e^{-j(\varphi_{12} - \varphi_2)}}{\sqrt{(1 - a_1a_2 + k^2 Q_1 Q_2)^2 + (a_1 + a_2)^2}}; \\ \dot{I}_2 &= 2I_{2\text{мм}} = \frac{k\sqrt{Q_1 Q_2} e^{-j(\varphi_{12} - \frac{\pi}{2})}}{\sqrt{(1 - a_1a_2 + k^2 Q_1 Q_2)^2 + (a_1 + a_2)^2}}, \end{aligned}$$

$$\text{где } \varphi_2 = \arctg(a_2), \quad \varphi_{12} = \arctg\left(\frac{a_1 + a_2}{1 - a_1a_2 + k^2 Q_1 Q_2}\right).$$

Уравнение для резонансных кривых токов I_1 и I_2 получаем:

$$n_1 = \frac{I_1}{(I_{1\max})_{X_{12\text{нм}}}} = \frac{2\sqrt{1+a_2^2}}{\sqrt{(1-a_1a_2+k^2Q_1Q_2)^2+(a_1+a_2)^2}};$$

$$n_2 = \frac{I_2}{I_{2\text{бб}}} = \frac{2k\sqrt{Q_1Q_2}}{\sqrt{(1-a_1a_2+k^2Q_1Q_2)^2+(a_1+a_2)^2}}.$$

Эти выражения справедливы для любых настроек контуров и для любых соотношений между добротностями контуров. Единственным ограничением является условие малого изменения частоты. Рассмотрим контуры с одинаковыми параметрами $\omega_{01} = \omega_{02}$; $Q_1 = Q_2$, тогда

$$a_1 = a_2 = a, \quad Q_1 = Q_2 = Q = \frac{1}{d}.$$

Получаем уравнение резонансных кривых

$$n_1 = \frac{2\sqrt{1+a^2}}{\sqrt{(1+k^2Q^2)^2+2a^2(1-k^2Q^2)+a^4}};$$

$$n_2 = \frac{2kQ}{\sqrt{(1+k^2Q^2)^2+2a^2(1-k^2Q^2)+a^4}}.$$

Форма резонансных кривых сильно зависит от произведения kQ (от фактора связи).

Если $kQ < 1$, то все слагаемые в подкоренном выражении положительны и с ростом величины расстройки $|a|$, а независимо от ее знака, знаменатель растет, а n_2 падает.

Таким образом, при $kQ > 1$, то второе слагаемое в подкоренном выражении будет отрицательно (при любом знаке a) и с увеличением расстройки знаменатель будет сначала падать, а затем расти. В соответствии с этим n_2 с увеличением расстройки $|a|$ вначале растет, а затем убывает. Это означает, что резонансная кривая обладает при $kQ > 1$ двумя максимумами: одним при $a_1 > 0$ и вторым при $a_2 < 0$, т.е. при частотах $\omega_1 > \omega_0$ и $\omega_2 < \omega_0$. При совпадении же частоты генератора ω с резонансными частотами контура ω_0 получается экстремум типа минимума.

Рассмотрим резонансную кривую для тока I_1 .

Величина коэффициента связи, соответствующая условию $kQ=1$, называется *критической*.

Обозначим критический коэффициент связи через $k_{кр}$. Тогда при $k < k_{кр}$ связь называется *слабой*, при $k > k_{кр}$ - *сильной*.

Итак, при слабой связи резонансная кривая одногорбая, при сильной связи – двугорбая.

Семейство кривых $n_2(a)$ для различных значений фактора связи приведены на рисунок 6.3. В точке $a=0$ ордината резонансной кривой для тока I_2 определяется выражением

$$n_2(0) = \frac{2kQ}{1+k^2Q^2}, \quad \text{или} \quad n_2(0) = \frac{2A}{1+A^2}.$$

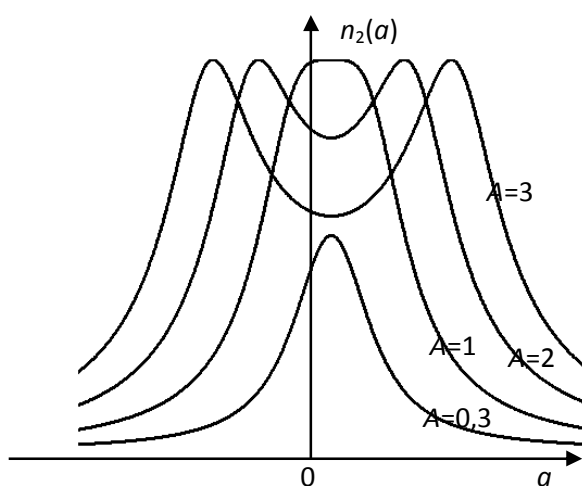


Рисунок 6.3. – Резонансные кривые тока 2-го контура

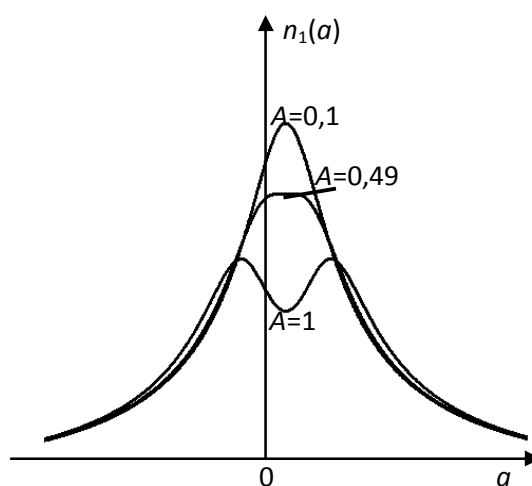


Рисунок 6.4. – Резонансные кривые тока 1-го контура

С увеличением $A = kQ$ глубина седловины в резонансной кривой растет. Критическое значение связи для 1-го контура определяется из условия $k_{кр}Q = 0,49$. Семейство резонансных кривых $n_1(a)$ при различных факторах связи приведены на рисунке 6.4

Фазовые характеристики для токов I_1 и I_2 в случае одинаковых контуров строятся согласно уравнений:

$$\varphi_1 = \arctg\left(\frac{2a}{1-a^2+k^2Q^2}\right) - \arctg(a);$$

$$\varphi_2 = \arctg\left(\frac{2a}{1-a^2+k^2Q^2}\right) - \frac{\pi}{2}.$$

Полоса пропускания системы связанных контуров

Считая резонансные частоты контуров одинаковыми, определим «полосу пропускания» системы как полосу частот, на границах которой амплитуда тока I_2 снижается до $\frac{1}{\sqrt{2}}$ от максимального значения амплитуды.

При слабой связи $kQ < 1$ максимум амплитуды I_2 получается при $a=0$

$$n_2(0) = \frac{2kQ}{1+k^2Q^2} = \frac{2A}{1+A^2}.$$

Значение обобщенной расстройки $|a_1|$ на границе полосы пропускания найдем из условия

$$\frac{2kQ}{\sqrt{2}(1+k^2Q^2)} = \frac{2kQ}{\sqrt{(1+k^2Q^2)^2 2a_0^2(1-k^2Q^2) + a_0^4}};$$

$$|a_0| = \sqrt{k^2Q^2 - 1 + \sqrt{2(1+k^4Q^4)}}.$$

Для перехода к полосе пропускания, выраженной в частотах, необходимо воспользоваться выражением $|a_0| = \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} Q$.

При очень слабой связи, когда $kQ \ll 1$ $|a_0| \approx \sqrt{0.41} \approx 0,64$.

При критической связи $kQ=1$ $|a_0| = \sqrt{2} \approx 1,41$.

При сильной связи, когда $kQ > 1$, необходимо иметь в виду, чтобы значение $n_2(0)$ было не меньше, чем на границе полосы пропускания, т.е.

$$n_2(0) = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Предварительное задание

1. Определить параметры контуров $\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_0$; $Q_1 = Q_2 = Q$; $f_{01} = f_{02} = f_0$.
2. Определить значение взаимной индуктивности M , при которых фактор связи равен $A=kQ=0,5$; 1; 2.
3. Рассчитать значение коэффициента связи k , при которых фактор связи равен $A=0,5$; 1; 2.
4. Определить частоты связи (при $k > k_{кр}$) по формулам

$$f_1 = \frac{f_0}{\sqrt{1+k}}; \quad f_2 = \frac{f_0}{\sqrt{1-k}}.$$

5. Рассчитать и построить резонансные кривые для 1-го и 2-го контуров для трех значений коэффициента связи $k=0.5k_{кр}$; $k=k_{кр}$; $k=2k_{кр}$.

Лабораторное задание

1. Собрать установку для снятия резонансных кривых системы связанных контуров.

2. Настроить первый контур на частоту f_0 при разомкнутом втором контуре.

3. Настроить второй контур на частоту f_0 при минимальной связи между контурами.

4. Изменяя связь между контурами, добиться максимума напряжения на втором контуре. Значение напряжения на входе усилителя в дальнейшем поддерживать постоянным.

5. Снять зависимость напряжения на первом и втором контурах от расстояния между катушками и построить эту зависимость.

6. Определить по данным п. 5 значения расстояния между катушками, при которых фактор связи $A=0,5$; 1; 2.

Примечание: Полученная в п.5 зависимость напряжения на втором контуре от расстояния в относительных единицах $U_{2м}/U_{2мм}$ определяется выражением $\frac{U_{2м}}{U_{2мм}} = \frac{2A}{1+A^2}$, где $U_{2мм}$ – наибольшее значение напряжения $U_{2м}$.

Задавая различные значения фактора связи $A=0,5$; 1; 2, находим по формуле значения $U_{2м}/U_{2мм}$, а по кривой – соответствующие им значения расстояния между катушками.

7. Снять зависимость напряжения на первом и втором контурах от частоты для трех значений фактора связи.

8. Построить указанные зависимости на тех же графиках, что и расчетные.

9. Определить частоты связи и полосу пропускания.

Лабораторная работа №6.

Экспериментальное определение А-параметров четырехполюсника

Цель работы: исследование фильтров типа «К»: получение зависимостей коэффициента затухания a и коэффициента фазы b от частоты, сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей.

Четырехполюсник, свободно пропускающий определенную область частот и непр пропускающий остальные, называется фильтром.

Простейший (идеальный) фильтр представляет симметричный четырехполюсник, составленный из конденсаторов и катушек индуктивности. Фильтр характеризуется характеристическим сопротивлением Z_c и коэффициентом распространения $\Gamma = a + jb$, где a – коэффициент затухания; b – коэффициент фазы.

В области пропускания коэффициент затухания $a=0$.

Фильтр считается согласованным с нагрузкой, если его характеристическое сопротивление равно сопротивлению нагрузки. Характеристическое сопротивление является функцией частоты, поэтому в общем случае невозможно создать согласованную нагрузку на всех частотах области пропускания.

Определим полосу пропускания и характеристическое сопротивление фильтра.

Фильтр представляет собой симметрический четырехполюсник и может быть представлен в виде П-образной (рисунок 7.1) или Т-образной (рисунок 7.2) схем.

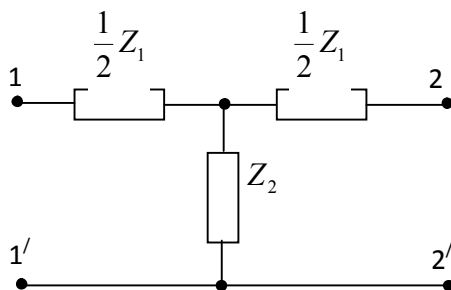


Рисунок 7.1. – П-образная схема фильтра

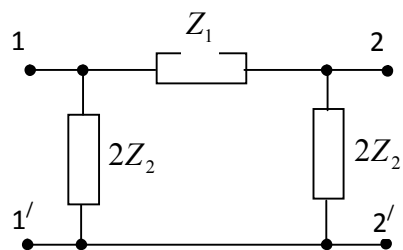


Рисунок 7.2. – Т-образная схема фильтра

Продольное сопротивление Z_1 , поперечное – Z_2 . Коэффициент A может быть определен по формуле

$$A = 1 + \frac{Z_1}{2Z_2} \text{ или}$$

$$A = ch\Gamma = ch(a + jb) = cha \cdot shjb + sha \cdot shjb = cha \cdot \cos b + jsha \cdot \sin b,$$

где $Z_1 = \pm jz_1$ и $Z_2 = \pm jz_2$.

В полосе пропускания коэффициент затухания $a=0$ и $ch\Gamma = chjb = \cos b = 1 + \frac{Z_1}{2Z_2}$.

Предыдущее условие выполняется до тех пор, пока сопротивления Z_1 и Z_2 связаны соотношением $-1 \leq 1 + \frac{Z_1}{2Z_2} \leq 1$.

Из последнего выражения следует, что в полосе пропускания характер сопротивлений $Z_1 = \pm jz_1$, $Z_2 = \pm jz_2$ должен быть различным.

Если $Z_1 = \pm jz_1$, то $Z_2 = \mp jz_2$, т.е. должно быть $1 \leq -\frac{z_1}{4z_2} \leq 0$.

Значит, величины сопротивлений должны удовлетворять условию

$$z_1 \leq 4z_2.$$

Граничные частоты полосы пропускания определяются уравнениями

$$\begin{cases} z_1 = 0, & z_2 = \infty; \\ z_1 = 4z_2. \end{cases}$$

В полосе пропускания коэффициент фазы b не остается постоянным и может быть найден из уравнения

$$\cos b = 1 + \frac{Z_1}{2Z_2},$$

$$\cos b = 1 - \frac{z_1}{2z_2}.$$

Так как $\cos b = 1 - 2\sin^2 \frac{b}{2}$, то коэффициент фазы может быть найден из выражения

$$\sin \frac{b}{2} = \pm \sqrt{\frac{z_1}{4z_2}}.$$

Выбор знака перед корнем зависит от конкретной схемы фильтра.

Найдем коэффициент затухания фильтра вне его полосы пропускания, т.е. в полосе задерживания.

У фильтров из чисто реактивных элементов полосой задерживания будем считать весь диапазон частот, для которого $a \neq 0$ и $sha \neq 0$, т.е. справедливы уравнения: для коэффициента фазы $\sin b = 0$; для коэффициента затухания $cha \cdot \cos b = 1 \pm \frac{z_1}{2z_2}$, где при $\sin b = 0$ имеем:

а) $\cos b = +1$ ($b=0$);

б) $\cos b = -1$ ($b = \pm \pi$).

Первое условие получается при одинаковом характере сопротивлений Z_1 и Z_2 , так что коэффициент затухания можно найти по формуле

$$ch = 1 + \frac{z_1}{2z_2}.$$

Так как $cha - 1 = 2sh^2 \frac{a}{2}$, то коэффициент затухания можно найти по формуле $sh(a/2) = \sqrt{\frac{z_1}{4z_2}}$.

Второе условие соответствует полосе частот, в которой сопротивление Z_1 и Z_2 имеют разный характер, но $z_1 \geq 4z_2$.

Коэффициент затухания определяется выражением $-cha = 1 - \frac{Z_1}{2Z_2}$.

Так как $cha + 1 = ch^2 \frac{a}{2}$, то коэффициент затухания можно найти по формуле $ch \frac{a}{2} = \sqrt{\frac{Z_1}{4Z_2}}$.

У реальных фильтров вследствие потерь и в полосе пропускания $a \neq 0$, но различие между напряжениями на входе и выходе должно быть достаточно мало.

Полосовой фильтр

Полосовой Т- или П-образный фильтр типа «К» (рисунки 7.3 и 7.4 соответственно) получается если Z_1 представляет собой входное сопротивление последовательного контура L_1C_1 , а Z_2 – параллельного контура L_2C_2 , резонансные частоты ω_0 которых совпадают

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}.$$

Рассмотрим Т-образную схему (рисунок 7.3) полосового фильтра, причем

$$X_1 = j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) = j \frac{1}{\omega C_1} \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1 \right); \quad X_2 = \frac{1}{j \left(\omega C_2 - \frac{1}{\omega L_2} \right)} = -j \frac{\omega L_2}{\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1}.$$

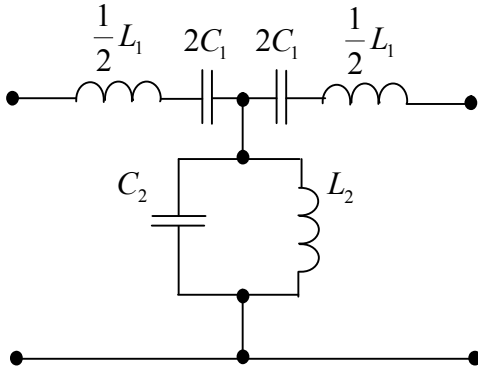


Рисунок 7.3. - Т-образная схема ФПЧ

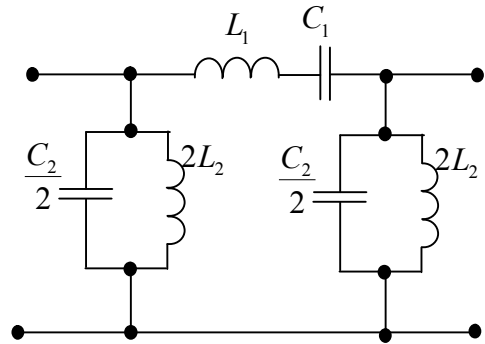


Рисунок 7.4. - П-образная схема ФПЧ

Параметр $K^2 = Z_1 Z_2 = \frac{L_2}{C_1}$ или с учетом равенства $L_1 C_1 = L_2 C_2$ $K^2 = \frac{L_1}{C_2}$.

На любой частоте сопротивления Z_1 и Z_2 имеют различный характер; если Z_1 - емкостное сопротивление, то Z_2 - индуктивное и наоборот.

Можно построить множество полосовых фильтров типа «К» с одним и тем же значением резонансной частоты ω_0 , изменяя отношение $\frac{L_2}{L_1} = \frac{C_1}{C_2} = n^2$.

От величины n зависит полоса пропускания фильтра. Для полосового фильтра из условия $z_1 = 4z_2$ имеем

$$\frac{1}{\omega C_1} \left| \frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1 \right| = 4\omega L_2 \left| \frac{1}{\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1} \right|, \text{ или } (\omega^2 - \omega_0^2)^2 = 4\omega_0^4 \omega^2 n^2 L_1 C_1.$$

Из уравнения для граничных частот $\omega^2 \mp 2n\omega_0\omega - \omega_0^2 = 0$ получаем два значения частоты, имеющих физический смысл

$$\omega_1 = \omega_0 \left(\sqrt{n^2 + 1} - n \right), \quad \omega_2 = \omega_0 \left(\sqrt{n^2 + 1} + n \right),$$

причем $\omega_1\omega_2 = \omega_0^2$ или $\omega_0 = \sqrt{\omega_1\omega_2}$.

Условие $z_1=0$ дает частоту $\omega = \omega_0$. Частота ω_0 находится внутри полосы пропускания. Это означает, что коэффициент фазы b в полосе пропускания изменяется от $(-\pi)$ до $(+\pi)$, проходя значение 0 при частоте ω_0 .

При частоте $\omega = \omega_0$ наступает резонанс напряжений в последовательном контуре и резонанс токов в параллельном контуре, поэтому $U_2 = U_1$, $I_2 = I_1$ или коэффициент затухания $a=0$.

Частотные зависимости коэффициента затухания a и коэффициента фазы b , представленные на рисунке 7.5 рассчитываются по формулам:

$$a = 2 \operatorname{Arcch} \sqrt{\frac{z_1}{4z_2}}; \quad b = 2 \operatorname{Arcsin} \left(\pm \sqrt{\frac{z_1}{4z_2}} \right),$$

знак плюс берется для области частот, где $\omega < \omega_0$, а знак минус – для области частот, где $\omega > \omega_0$.

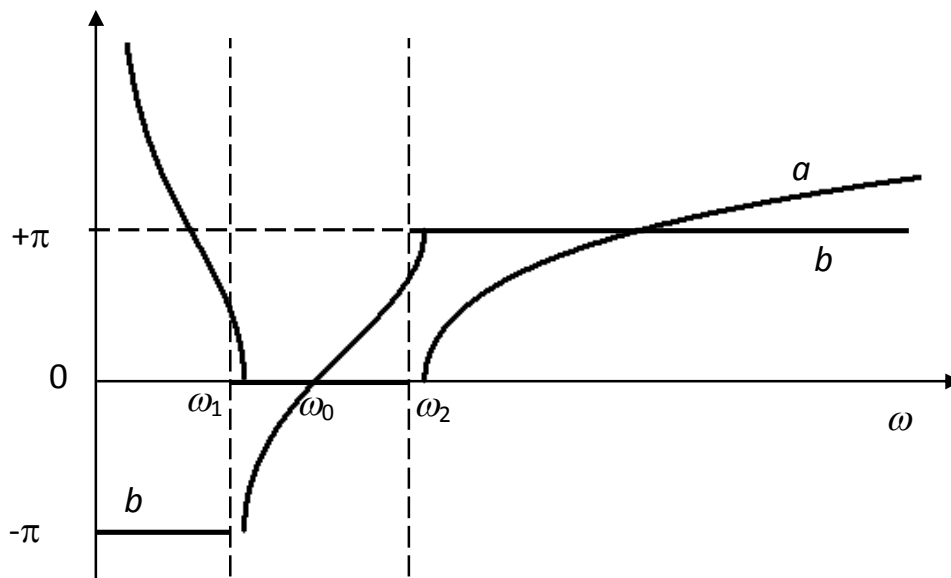


Рисунок 7.5. – Частотные характеристики полосового фильтра

Частотные зависимости характеристического сопротивления ФПЧ (рисунок 7.6) находятся из выражений

$$Z_T = \sqrt{\frac{L_2}{C_1}} \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}{4n^2}}; \quad Z_{\Pi} = \sqrt{\frac{L_2}{C_1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}{4n^2}}}.$$

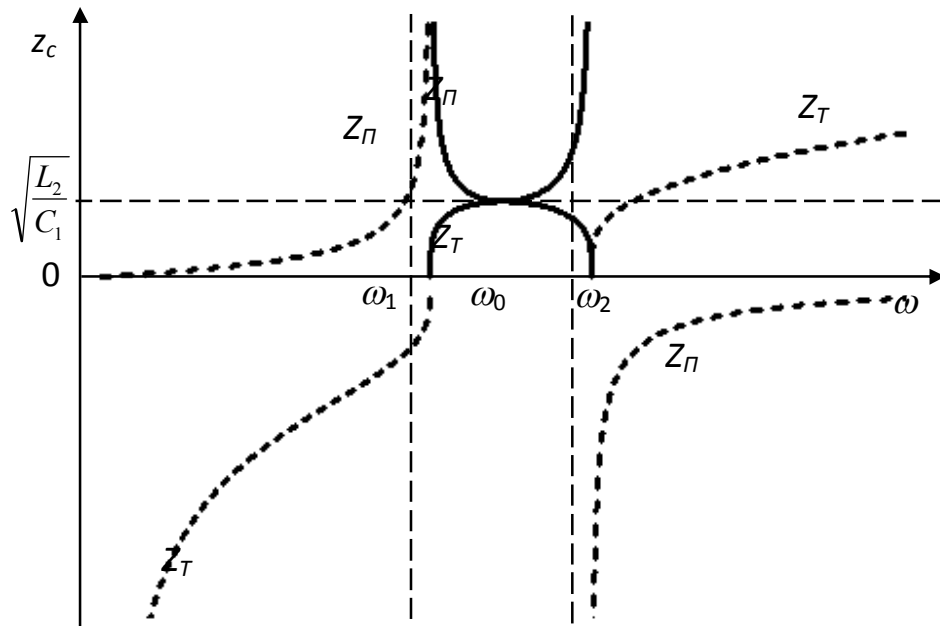


Рисунок 7.6. – Частотные зависимости характеристического сопротивления полосового фильтра

Заграждающий фильтр

Когда ставится задача подавить один или несколько сигналов, занимающих спектр частот от $\omega_1 \neq 0$ до $\omega_2 \neq \infty$, то применяется заграждающий фильтр типа «К» может быть получен, если Z_1 представляет собой входное сопротивление параллельного контура $L_1 C_1$, а Z_2 – последовательного контура $L_2 C_2$, резонансные частоты которых совпадают. П-образная и Т-образная схемы такого фильтра представлены на рисунках 7.7 и 7.8.

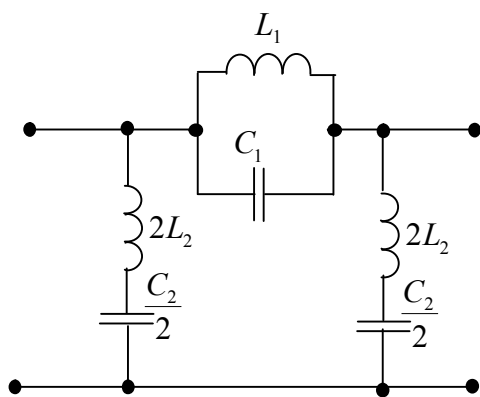


Рисунок 7.7. – П-образная схема
заграждающего фильтра

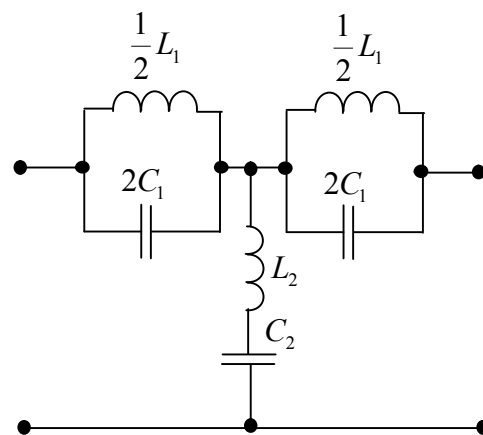


Рисунок 7.8. – Т-образная схема
заграждающего фильтра

Лабораторная работа №7. Исследование трехфазного асинхронного двигателя

Целью лабораторной работы является практическое изучение студентами устройства асинхронного двигателя, маркировки выводов его обмоток, методов измерения сопротивления изоляции обмоток, исследование рабочих свойств и механических характеристик.

4.1. Программа лабораторной работы

1. Изучение принципа действия и конструкции асинхронных двигателей с фазным и короткозамкнутым ротором.
2. Разработка принципиальной электрической схемы для выполнения опытов.
3. Измерение сопротивления изоляции обмоток статора и ротора.
4. Определение коэффициента трансформации.
5. Выполнение опыта холостого хода.
6. Снятие рабочих и механической характеристик.
7. Заключение по работе.

Пункты 1 и 2 студенты выполняют до начала лабораторного занятия и записывают соответствующие материалы в отчёт. Эти материалы и подготовленный протокол испытания двигателя служат допуском к лабораторной работе.

4.2. Принцип действия и устройство асинхронных двигателей

При протекании трёхфазной системы токов по трёхфазной обмотке статора в двигателе создаётся магнитное поле, распределённое вдоль окружности воздушного зазора между статором и ротором по синусоидальному закону и вращающееся в направлении чередования фаз с угловой скоростью $\omega_1 = 2\pi n_1$ (рис. 4.1).

Это поле обеспечивает изменяющееся во времени потокоцепление с обмотками статора и ротора, индуцирующее в них ЭДС. Под действием ЭДС ротора в проводниках его обмотки протекают переменные токи, которые совместно с токами статора создают результирующее поле с индукцией B_δ в зазоре (рис. 4.2). В результате взаимодействия этого поля с токами ротора на проводники ротора действуют электромагнитные силы (силы Ампера), определяющие момент M , который может привести ротор во вращение с угловой скоростью $\omega < \omega_1$ в направлении вращения поля, преодолевая момент сопротивления

$$M_c = M_2 + M_0, \quad (4.1)$$

состоящий из момента сопротивления M_2 рабочего механизма, сочленённого с двигателем, и момента потерь самого двигателя M_0 .

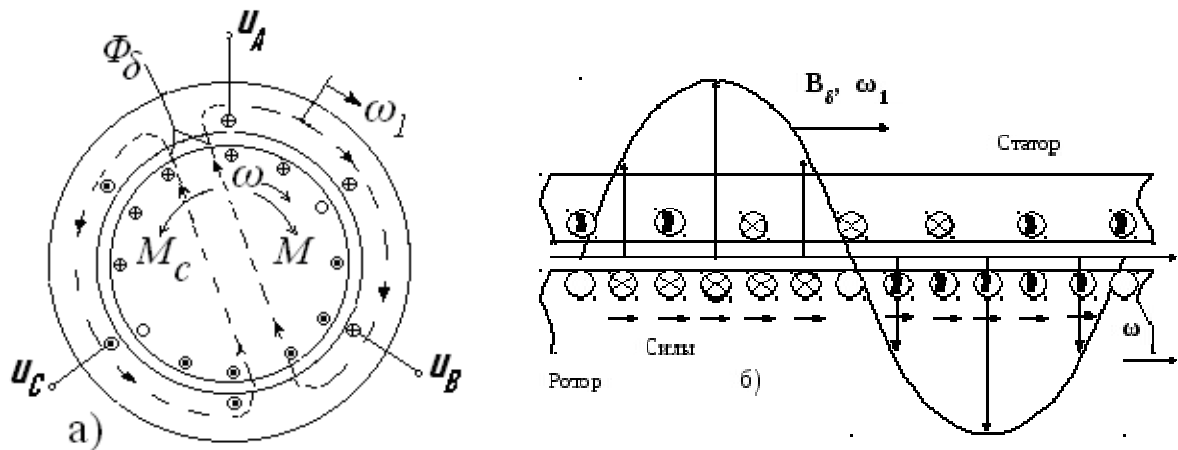


Рис. 4.1. К принципу действия асинхронного двигателя (крестики и точки – направления намагничивающей составляющей тока статора и ЭДС и активной составляющей тока ротора)

Движение ротора двигателя совместно с механизмом описывается известным уравнением механики:

$$M - M_c = J (d\omega/dt), \quad (4.2)$$

где J – суммарный момент инерции вращающихся частей. Согласно уравнению (4.2), если $M > M_c$, то ускорение $d\omega/dt > 0$ и, следовательно, ротор разгоняется до скорости $\omega < \omega_1$, при которой его момент будет равен моменту сопротивления $M = M_c$. Ротор не может разогнаться до скорости поля из-за наличия момента сопротивления на валу. ЭДС, токи ротора и электромагнитный момент возникают только при $\omega \neq \omega_1$, т.е. когда ротор проскальзывает относительно поля. Относительную скорость проскальзывания ротора и поля называют скольжением S :

$$S = (\omega_1 - \omega)/\omega_1 = (n_1 - n)/n_1, \quad (4.3)$$

где n_1 и n – частоты вращения магнитного поля и ротора соответственно.

Энергия источника переменного тока (сети), подводимая к обмотке статора, превращается в механическую энергию на валу, передаваемую рабочему механизму, и частично – в потери самого двигателя. При этом ротор вращается со скоростью $\omega < \omega_1$, т.е. несинхронно с магнитным полем, поэтому рассматриваемое устройство является асинхронным двигателем.

Ротор вращается под действием электромагнитного момента M в направлении вращения магнитного поля. Следовательно, для изменения направления вращения ротора (реверса) необходимо изменить чередование фаз на обмотке статора. Для этого достаточно поменять местами два любых проводника, подводящих напряжение к обмотке статора.

На внутренней цилиндрической поверхности сердечника статора и наружной поверхности сердечника ротора имеются равномерно распределённые пазы для обмоток. Обмотка статора выполняется из медных

изолированных проводников. Обмотка ротора может быть выполнена в виде системы стержней из сплава алюминия, залитого в пазы сердечника ротора, и замыкающих колец на торцах. В мощных машинах стержни и кольца выполняют из меди либо латуни. Такую обмотку называют беличьей клеткой, а ротор - короткозамкнутым. В другом варианте обмотка ротора выполняется трёхфазной аналогично обмотке статора и соединяется в звезду. При этом начала фаз обмотки ротора присоединяют к трём изолированным стальным, бронзовым или латунным кольцам, расположенным на валу двигателя. На кольца установлены неподвижные щётки, к которым можно подключать, например, дополнительные сопротивления. Ротор с такой обмоткой называют фазным.

Конструкцию асинхронного двигателя вначале можно изучить, используя учебники или справочники по электрическим машинам [2,3,4,5], а затем по плакатам и макетам, имеющимся в лаборатории. В отчёте следует поместить упрощённый эскиз двигателя с фазным ротором, пронумеровать и назвать все функционально важные элементы, указать их назначение и используемые материалы. На рис. 4.2 и 4.3 приведены конструкции наиболее распространённых асинхронных двигателей.

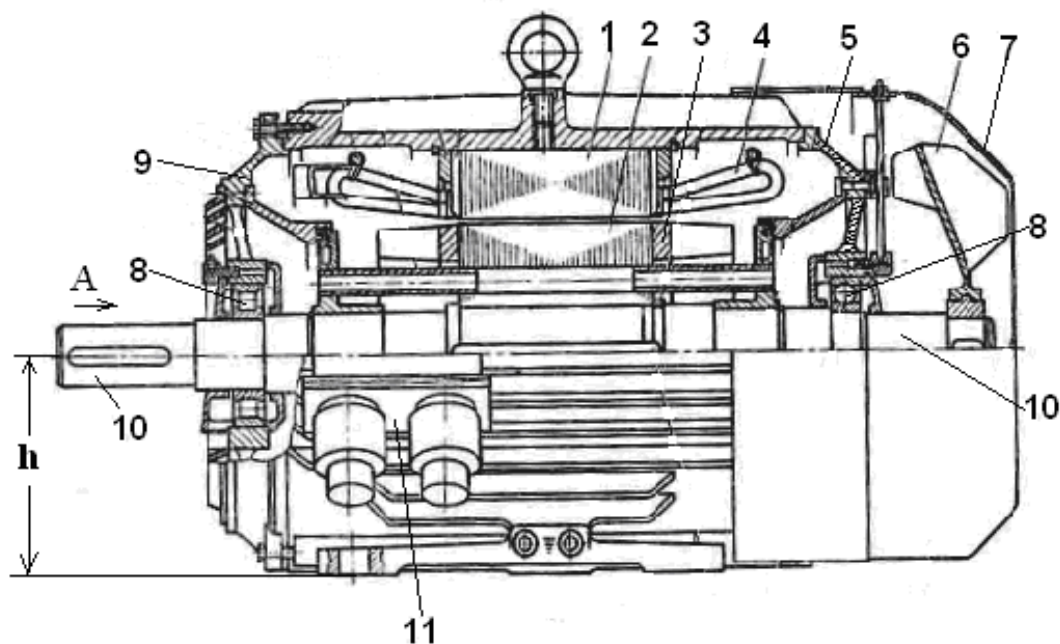


Рис. 4.2. Асинхронный двигатель серии 4А со степенью защиты IP44:

1, 2 – сердечники статора и ротора; 3 – короткозамыкающее кольцо обмотки ротора; 4 – обмотка статора; 5, 9 – подшипниковые щиты; 6 – вентилятор; 7 - кожух вентилятора; 8 – подшипники; 10 – вал; 11 – коробка выводов; h – высота оси вращения

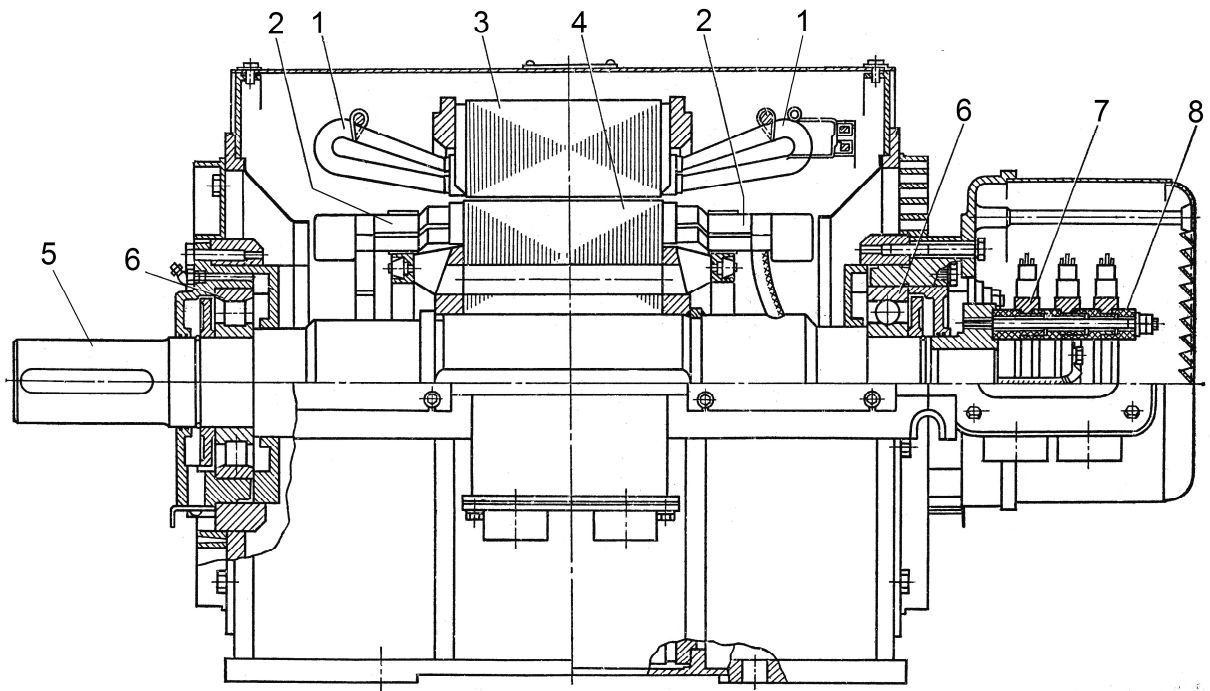


Рис. 4.3. Асинхронный двигатель серии 4А с фазным ротором и степенью защиты IP23: 1, 2 – обмотки статора и ротора; 3, 4 – сердечники статора и ротора; 5 – вал; 6 – подшипники; 7 – контактное кольцо; 8 – изоляция контактных колец

4.3. Объект исследования и необходимое оборудование

Объектом исследования в работе служит двигатель МЗ универсального лабораторного стенда. Это крановый трёхфазный асинхронный двигатель с фазным ротором типа МТФ-111-6, имеющий следующие технические данные:

3,2 кВт, 895 об/мин, $\cos\varphi_H=0,73$, КПД 70%, максимальный электромагнитный момент 85 Н.м, $f_H = 50$ Гц; обмотка статора 220/380 В, 18,7/10,8 А, соединение Δ/Y ; обмотка ротора 176 В, 15 А, соединение Y.

Активные сопротивления фаз обмотки статора $r_{1020} = 2$ Ом при температуре $\theta = 20$ °С.

При выполнении лабораторной работы рекомендуется использовать следующее оборудование стенда:

- исследуемый двигатель МЗ;
- регулируемый источник U1 трёхфазного напряжения 3~50 Гц, 0-220 В для питания обмотки статора исследуемого двигателя; коммутируется кнопками S1 и S2;
- пускорегулирующий реостат Rпр2, подключённый к выводам P1, P2, P3 обмотки ротора. Реостат соединяется в звезду переключателем SA20 в положении Y. Сопротивление реостата изменяется в три ступени переключателем SA16;

- комплект измерительных приборов типа К505 или К506 для измерения линейных токов, напряжений и активной мощности, подводимых к исследуемому двигателю МЗ. Следует иметь в виду, что вольтметр комплекта К505 показывает напряжение, заниженное в $\sqrt{3}$ раз по сравнению с линейным, если обмотка двигателя соединена в треугольник и система напряжений симметрична, а ваттметр измеряет мощность фазы в каждом положении переключателя фаз. Ваттметр комплекта К506 измеряет мощность трех фаз;

- генератор G1 постоянного тока, создающий нагрузочный момент на валу исследуемого двигателя;

- регулируемый источник U_{B1} постоянного тока 0-230 В для питания обмотки возбуждения нагрузочного генератора G1; коммутируется одновременно с источником U1 кнопками S1 и S2;

- сопротивление нагрузки $R_{НГ}$ генератора G1, регулируемое с помощью моторного привода, управляемого кнопками $R_{НГ}$.

Частота вращения ротора исследуемого двигателя определяется по прибору *pn* на панели стенда. Шкала прибора соответствует 2000 об/мин. Показание прибора необходимо умножить на 0,64 (из-за разных диаметров шкивов на валах машин стенда).

На стенде действуют блокировки и защиты от грубейших ошибок испытателей, поэтому для включения источников U1 и U_{B1} и нормальной работы исследуемого двигателя нужно перед каждым его включением устанавливать переключатели и рукоятки в следующие положения:

SA10→Г, SA11→ГПА, SA12→ ~ , SA13→0, SA15→0, SA16→0, SA19→0, SA20→Y (или в положение "O", если необходимо разомкнуть роторную цепь); SA22→1; $(U_{B2})_{\min}$, $(U1)_{\min}$, $(U_{B1})_{\min}$, $(R_{НГ})_{\max}$, $(X_{НГ})_{\max}$.

Для запуска двигателя МЗ после включения источников кнопкой S1 "Пуск" плавно повышайте напряжение U_I до достижения необходимого значения в опыте, после чего выведите пускорегулирующий реостат $R_{ПР2}$, переключая SA16 в положение 3, в котором цепь обмотки ротора закорочена.

Момент нагрузки на валу двигателя следует регулировать при максимальном значении напряжения возбуждения U_{B1} путём изменения сопротивления $R_{НГ}$ нагрузочного генератора G1. Далее уточнить нагрузку можно регулировкой U_{B1} .

4.5. Измерение сопротивления изоляции обмоток

Согласно ГОСТ 11828-86 [11] измеряется сопротивление изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками. Прибором для измерения сопротивления изоляции обмоток с номинальными напряжениями до 500 В включительно служит мегаомметр на 500 В. Измерение

сопротивления изоляции относительно корпуса машины и между обмотками следует производить поочерёдно для каждой цепи, имеющей отдельные выводы, при электрическом соединении всех прочих цепей с корпусом машины. Если же обмотка наглухо сопряжена в звезду или треугольник, измерение производится для всей обмотки по отношению к корпусу.

Зажим мегаомметра, предназначенный для соединения с "землей", и по одной клемме 2-й и 3-й фаз обмотки статора подключите к клемме стенда, связанной с корпусом машины. Второй зажим мегаомметра подключите к любой клемме 1-й фазы статора. Переключите мегаомметр на измерение сопротивления в мегаомах. Равномерно вращая рукоятку мегаомметра с достаточно большой скоростью, измерьте сопротивление изоляции 1-й фазы по шкале мегаом. Аналогичные измерения произведите, подключая мегаомметр, сначала ко 2-й, а затем к 3-й фазам статора; при этом свободные фазы соединяйте с корпусом машины.

Для обмотки ротора, наглухо сопряжённой в звезду, удастся сделать лишь одно измерение сопротивления изоляции всей обмотки относительно корпуса двигателя.

В протоколе запишите измеренные значения сопротивления изоляции двигателя и температуру его обмоток. За последнюю можно принять температуру окружающей среды θ_0 , если измерение сопротивления изоляции производилось в практически холодном состоянии машины.

В отчете приведите истинные значения сопротивления изоляции обмоток статора r_{u1} и ротора r_{u2} , а также температуру θ_0 , при которой произведены измерения. За истинное значение сопротивления изоляции обмотки статора принимают его наименьшее значение из трёх измерений, соответствующих трём фазам обмотки статора.

4.6. Определение коэффициента трансформации

По ГОСТ 7217-87 [13] для определения коэффициента трансформации двигателей с фазным ротором подводят номинальное линейное напряжение к обмотке статора при неподвижном роторе и разомкнутой его обмотке и измеряют линейные напряжения на зажимах обмотки статора и на кольцах ротора.

В отчете вычислите:

- средние арифметические значения линейных напряжений статора $U_{Л1}$ и ротора $u_{Л2}$ и соответствующие им фазные напряжения $U_{\Phi 1}$ и $U_{\Phi 2}$;
- коэффициент трансформации $K_T = U_{\Phi 1} / U_{\Phi 2}$.

4.7. Опыт холостого хода

Холостой ход соответствует работе двигателя без нагрузки. Опыт проводится с целью определения тока и потерь холостого хода в режиме ненагруженного двигателя. В соответствии с ГОСТ 7217-87 [13] искомые

величины определяют по результатам соответствующих измерений при различных значениях напряжения на статоре, начиная с наибольшего, равного 130% номинального, и кончая возможно более низким, при котором ещё не наблюдается возрастание тока статора. Во время опыта обмотка ротора после пуска двигателя должна быть замкнута накоротко на выводах ротора и двигатель должен находиться в установившемся тепловом состоянии.

Предлагаемая ниже методика учебного опыта холостого хода несколько отличается от стандартной некоторыми упрощениями.

Подключите двигатель к 3-фазному регулируемому источнику напряжения, предусмотрите необходимые измерительные приборы. Включите источник, поднимите его напряжение до максимального и после разгона двигателя выведите пускорегулирующий реостат $R_{пр2}$ в цепи ротора. Изменяйте напряжение источника, подводимое к обмотке статора двигателя. В опыте рекомендуется производить 9...11 отсчётов при различных значениях напряжения: вначале при максимально возможном напряжении источника, далее при меньших напряжениях приблизительно через одинаковые интервалы до минимального значения (около 50 В), при котором начинает заметно увеличиваться ток. При напряжениях менее 100 В следует делать паузу в 1-2 мин перед замерами, чтобы установились ток и частота вращения двигателя.

Измеряйте одно линейное напряжение $U_{Oл}$ и один линейный ток $I_{Oл}$ статора, активную мощность P_O , подводимую к двигателю, и температуру $\theta_{O\text{воздуха}}$ в лаборатории. Если для измерений используется комплект К505 с одним дополнительным трансформатором тока, то измеренную мощность фазы необходимо умножить на три. В случае использования комплекта К506 ваттметр показывает суммарную подводимую мощность всех фаз P_O .

В отчёте вычислите для каждого уровня напряжения и запишите в табличной форме:

- значения линейного напряжения $U_{Oл}$ и линейного тока $I_{Oл}$ обмотки статора, а также подводимую к двигателю активную мощность (потери холостого хода) $P_O = 3 P_{Oф}$;

- значение коэффициента мощности $\cos\varphi_O = P_O / \sqrt{3} U_{Oл} I_{Oл}$;

- потери в обмотке статора от тока холостого хода $P_{M1} = I_{Oл}^2 r_{1XX}$,

где r_{1XX} - активное сопротивление одной фазы обмотки статора при температуре двигателя в опыте холостого хода θ_{XX} :

$$r_{1XX} = r_{1\theta_0} (1 + \alpha \theta_{XX}) / (1 + \alpha \theta_0),$$

где $\alpha = 0,00411 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ - температурный коэффициент сопротивления меди; $r_{1\theta_0}$ - сопротивление обмотки при температуре θ_0 , определенное

опытным путём или по техническим данным двигателя (п. 4.3); ориентировочно можно принять $\theta_{\text{ХХ}} = \theta_0 + 10^\circ$;

- сумму потерь в стали (включая добавочные потери холостого хода) и механических: $P_{\text{СТ}} + P_{\text{МХ}} = P_0 - P_{\text{МЛ}}$.

Постройте:

- графики характеристик холостого хода $I_{\text{ОЛ}}$, P_0 , $\cos\varphi_0 = f(U_{\text{ОЛ}})$ на едином рисунке, подобном рис. 4.5. Проведите касательную к кривой тока из начала координат; точки, лежащие левее точки или точек касания, не учитывайте (отбросьте) при дальнейшей обработке результатов опыта;

- график $P_{\text{СТ}} + P_{\text{МХ}} = f(U_{\text{ОЛ}})^2$; экстраполируйте его нижнюю прямолинейную часть на ось ординат (рис. 4.6).

Определите по построенным графикам значения P_0 , $P_{\text{СТ}}$, $P_{\text{МХ}}$, $I_{\text{ОЛ}}$ и $\cos\varphi_0$, соответствующие номинальному напряжению двигателя. Вычислите относительное значение тока холостого хода $i_0 = I_{\text{ОЛ}}/I_{\text{НЛ}}$ при номинальном напряжении. Значение номинального линейного тока $I_{\text{НЛ}}$ обмотки статора при соединении её по соответствующей схеме приведено в п. 4.3.

Контрольные вопросы

1. Как устроены асинхронные двигатели с короткозамкнутым и фазным ротором? Объясните принцип действия асинхронного двигателя.

2. Объясните назначение, место включения каждого элемента схемы и расположение обмоток в двигателе.

3. Каким уравнением моментов описывается работа двигателя с рабочим механизмом? Поясните физический смысл величин, входящих в уравнение. Какими факторами определяются эти величины?

4. Какими способами запускают асинхронные двигатели с короткозамкнутым и фазным ротором? Как объяснить процессы, протекающие в двигателе при пуске?

5. Сравните пусковые свойства асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором.

6. Объясните предпусковое положение регулирующих элементов в схеме установки в отчёте и последовательность операций при пуске.

7. Как и с какой целью измеряют сопротивление изоляции обмоток?

8. Как разделяют потери холостого хода?

9. Какие потери мощности возникают в асинхронном двигателе и от каких факторов они зависят? На что влияют потери?

10. График какой зависимости и при каких условиях называют механической характеристикой двигателей? Как выглядят графики естественных и искусственных характеристик?

Лабораторная работа №8.

Исследование линейных цепей в переходном режиме

Цель работы: Целью работы является исследование колебательного и апериодического разрядов конденсатора с помощью электронно-лучевого осциллографа.

Пусть конденсатор, заряженный до напряжения U_0 , разряжается на резистор R . Согласно второму закону Кирхгофа, запишем:

$$RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = 0.$$

Решение этого уравнения можно записать в виде $U_C(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$,

где $\tau = RC$ - постоянная времени цепи. Величина, обратная $\frac{1}{\tau} = b$ - называется коэффициентом затухания цепи RC .

По кривой напряжения, полученной на экране осциллографа, можно определить величину τ (рисунок 8.1).

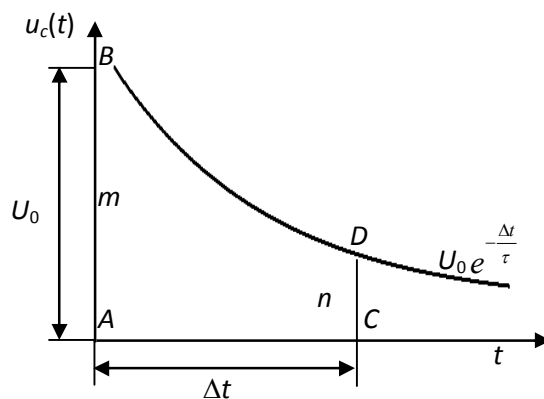


Рисунок 8.1. – Переходное напряжение на конденсаторе

Начальное напряжение на конденсаторе измеряется отрезком АВ длиной m , а значение напряжения через промежуток времени Δt - отрезком CD длиной n . Отношение напряжений равно отношению соответствующих отрезков

$$\frac{U_0}{U_0 e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}} = \frac{m}{n};$$

$$e^{\frac{\Delta t}{\tau}} = \frac{m}{n}.$$

Отсюда $\frac{\Delta t}{\tau} = \ln \frac{m}{n}; \quad \tau = \frac{\Delta t}{\ln \frac{m}{n}}.$

Если величина R известна, то емкость находится из выражения $C = \frac{\tau}{R}.$

Разряд конденсатора на резистор и индуктивную катушку

Пусть конденсатор, заряженный до напряжения U_0 , подключается к цепи RC (рисунок 8.2).

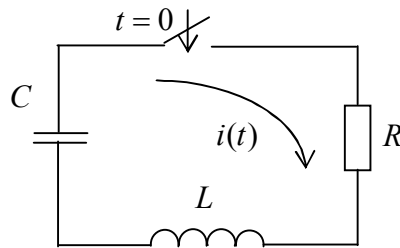


Рисунок 8.2. – Схема электрической цепи

Согласно второму закону Кирхгофа получим

$$LC \frac{d^2 U_C}{dt^2} + RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = 0. \quad \text{Корни характеристического уравнения}$$

определяются из выражения $p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}.$

Характер разряда конденсатора зависит от знака подкоренного выражения.

Апериодический разряд конденсатора

Если корни характеристического уравнения действительные, то имеем место апериодический разряд, когда напряжение на конденсаторе монотонно спадает от U_0 до нуля (т.е. не происходит перезаряд конденсатора).

Напряжение на конденсаторе

$$U_C(t) = \frac{U_0}{(p_2 - p_1)} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}).$$

$$\text{Ток в цепи } i(t) = \frac{U_0}{L(p_2 - p_1)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}).$$

Ток в цепи сначала возрастает, достигает своего максимума и затем постепенно уменьшается до нуля (рисунок 8.3)

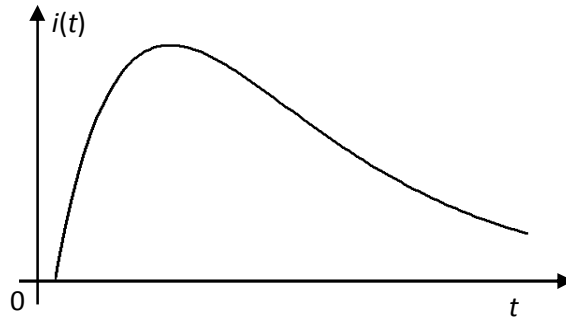


Рисунок 8.3. – Переходный ток в цепи RLC

Колебательный разряд

Если сопротивление контура меньше критического, то корни характеристического уравнения комплексные и сопряженные. При этом разряд носит колебательный характер.

Введем обозначения:

$$b = \frac{R}{2L}; \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}; \quad \sqrt{b^2 + \omega_0^2} = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Для корней характеристического уравнения получим:

$$p_{1,2} = -b \pm j\omega_0.$$

Напряжение на конденсаторе в этом случае представляет затухающую периодическую функцию с угловой частотой собственных колебаний ω_0 и коэффициентом затухания b (рисунок 8.4)

$$U_C(t) = \frac{U_0}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-bt} \sin(\omega_0 t + \chi),$$

где $\chi = \arctg \frac{\omega_0}{b}$.

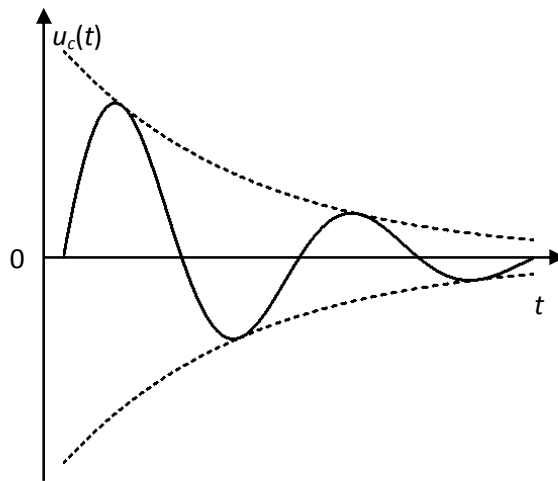


Рисунок 8.4. – Переходное напряжение на конденсаторе

По изображению на экране осциллографа можно определить частоту ω_0 , коэффициент затухания b , а затем величину индуктивности и активного сопротивления, если известна емкость конденсатора.

Период T_0 – это промежуток времени, в течении которого совершается одно полное колебание, следовательно, T_0 можно измерить непосредственно по оси t .

Чтобы определить b , возьмем отношение напряжений в двух точках кривой, отстоящих на время nT_0 . Отсюда

$$b = \frac{\ln \frac{U_c(t)}{U_c(t + nT_0)}}{nT_0},$$

R и L находим по формулам

$$b = \frac{R}{2L}; \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Лабораторное задание

Определение емкости конденсатора

1. Собрать цепь. Замкнуть накоротко магазин индуктивностей.
2. Включить питание реле (тумблер В1). Развертку по времени установить так, чтобы на экране осциллографа был четко виден период повторений ($T=0,02$ с.).

3. Отрегулировать так сопротивление R , чтобы за время $t=0,01$ с конденсатор не успел полностью разрядиться.
4. Определить величину емкости по изображению на экране.

Исследование колебательного разряда

1. Рассчитать параметры схемы R_1 и L_1 для колебательного разряда конденсатора с емкостью, определенной в п.4. Принять коэффициент затухания таким, чтобы отношение

$$\frac{U_C(t_1)}{U_C(0)} = k,$$

$U_C(0)$ – начальная амплитуда напряжения ($t=0$);

$U_C(t_1)$ – амплитуда напряжения на конденсаторе через время t_1 ;

$K=0,01$ (процесс разряда практически заканчивается).

Угловую частоту ω_0 принять равной $20b$.

2. Установить рассчитанные величины сопротивления и индуктивности и снять закоротку с магазина индуктивностей.

3. По изображению напряжения $U_C(t)$ на экране осциллографа, определить действительную частоту ω_0' и коэффициент затухания b' .

Анализ работы заграждающего фильтра выполняется так же, как и полосового. Частотные зависимости коэффициента затухания и коэффициента фазы представлены на рисунке 7.9.

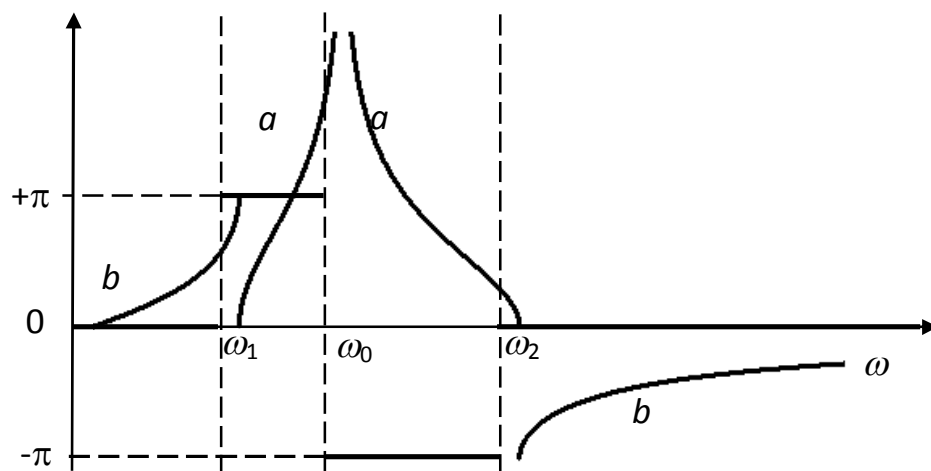


Рисунок 7.9. – Частотные характеристики сопротивления заграждающего фильтра

Частотные зависимости характеристических сопротивлений (рисунок 7.10) находятся из выражений:

$$Z_T = \sqrt{\frac{L_1}{C_2}} \sqrt{1 - \frac{1}{4n^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}, Z_{\Pi} = \sqrt{\frac{L_1}{C_2}} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{4n^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}}.$$

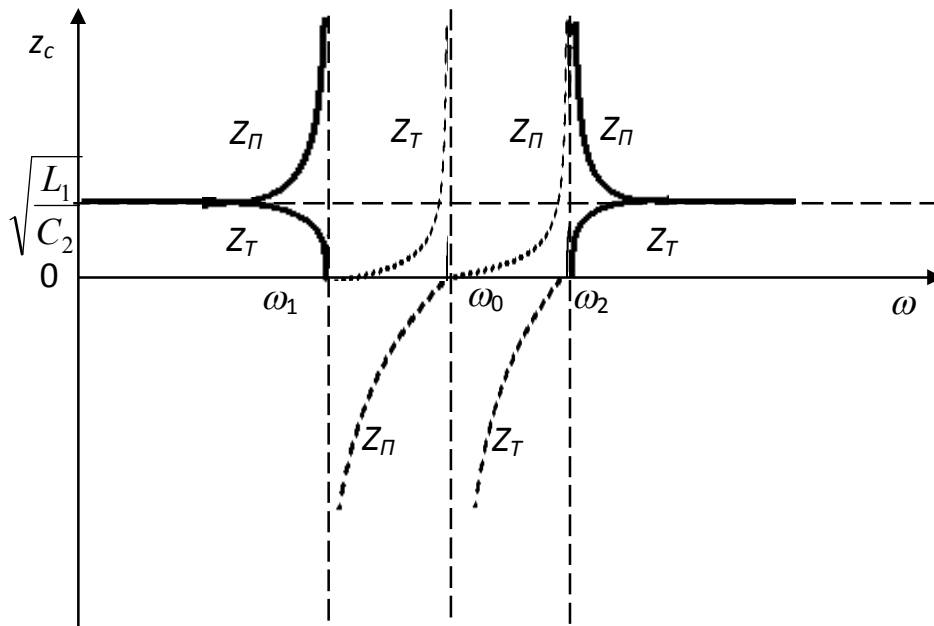


Рисунок 7.10. – Частотные характеристики характеристического сопротивления заграждающего фильтра

Порядок выполнения работы

Предварительный расчет

Согласно варианту задания:

1. Рассчитать резонансную ω_0 и граничные частоты ω_1 и ω_2 .
2. Определить сопротивление нагрузки фильтра (на частоте ω_0).
3. Рассчитать и построить частотные характеристики коэффициента затухания и коэффициента фазы.
4. Рассчитать и построить частотную зависимость характеристического сопротивления.

Лабораторное задание

1. Собрать схему установки для измерения коэффициента затухания и коэффициента фазы фильтра.

2. Снять зависимость коэффициента затухания и коэффициента фазы от частоты (измерения проводить на тех частотах, для которых проведен теоретический расчет).

3. Построить зависимости $a = F_1(f)$, $b = F_2(f)$ на тех же графиках, что и расчетные.

Лабораторная работа №9. Исследование цепей с распределенными параметрами

Цель работы: целью работы является экспериментальное исследование распределения напряжения вдоль линии при различных видах нагрузки.

Общие теоретические сведения:

Длинной линией называют такую линию, в которой длина волны λ соизмерима с физической длиной линии. Распространение волны напряжения вдоль линии характеризуется двумя вторичными параметрами:

1) коэффициентом распределения:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z}_0 \cdot \underline{y}_0} = \alpha + j \cdot \beta$$

где:

α – коэффициент затухания

β – коэффициент фазы;

2) Волновым сопротивлением

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{y}_0}}$$

В линии без потерь при х.х. и к.з. возникают стоячие волны с длиной

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{\beta}$$

волны

Режим, когда сопротивление нагрузки \underline{Z}_2 равно волновому сопротивлению линии \underline{Z}_B , называют режимом согласованной нагрузки. При согласованной нагрузке отраженные волны отсутствуют.

Порядок выполнения работы

1. Для заданной частоты $f=1000$ Гц (по схеме согласно рис.15) снять и построить кривые распределения напряжения U_K вдоль линии в режиме х.х. и к.з. ($k=1,2,3\dots 10$). Напряжение в начале линии устанавливается по указанию преподавателя.

Данные свести в таблицу 15.

Из построенных характеристик определить длину волны λ (км).

2. Рассчитать коэффициент фазы β по формуле:

$$\beta = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad (\text{рад/км})$$

3. Зная величину $C_0=2,2$ мкФ, рассчитать значение L_0 по формуле:

$$L_0 = \frac{\beta^2}{\omega^2 \cdot C_0} \quad (\text{Гн})$$

здесь $\omega = 2\pi f$ - угловая частота

4. Определить величину волнового сопротивления

$$\underline{Z_B} = Z_B = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (\text{Ом})$$

5. Снять и построить зависимости распределения напряжения вдоль линии для нагрузки

$$Z_2 = Z_B \quad Z_2 = 2 \cdot Z_B \quad Z_2 = \frac{1}{2} \cdot Z_B$$

6. Для $Z_2 = Z_B$ определить коэффициент затухания α

$$\alpha = \frac{1}{l} \cdot \ln \frac{U_1}{U_{11}}$$

где l – длина всей линии.

7. Записать выражение для коэффициента распространения γ

$$\underline{\gamma} = \alpha + j \cdot \beta$$

8. Рассчитать для режима х.х. распределение напряжения вдоль линии по формуле

$$U_K = U_{11} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} (ch 2\alpha x + \cos 2\beta x)}$$

где $x = (l - k)$ – расстояние от конца линии до точки k

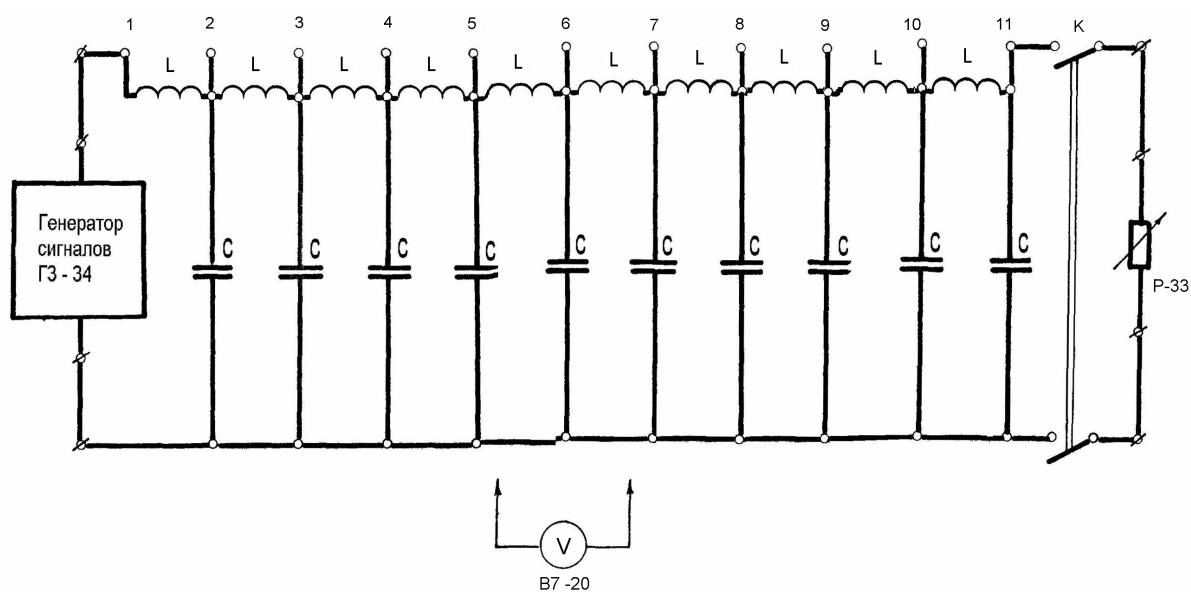
$$ch 2\alpha x = \frac{e^{2\alpha x} + e^{-2\alpha x}}{2}$$

аргумент кривого косинуса $2\beta x$ выражается в радианах.

9. Сделать заключение по выполненной работе.

Таблица

$K \backslash U_K$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Режим работы
B	8	8,31	6,9	4,23	4,41	6,65	6,51	4,28	1,2	3,45	6,08	$Z_2 = \infty$
B	6,36	5,35	6,99	7,58	5,89	2,97	3,57	6,2	6,36	4,36	0	$Z_2 = 0$
B	8	7,48	7	6,36	5,7	5,5	5,04	4,77	4,17	3,65	3,57	$Z_2 = Z_B$
B												$Z_2 = 2Z_B$
B												$Z_2 = 1/2 Z_B$



Контрольные вопросы

1. Что такое линия с распределенными параметрами?
2. Какие параметры линии являются первичными?
3. Какую линию называют неискажающей?
4. Что такое стоячие волны и условия их возникновения?
5. Как определить из графика длину волны?
6. Что такое согласованная нагрузка?

Лабораторная работа №10. Исследование двигателя постоянного тока

Цель работы: изучить устройство, принцип действия, характеристики электродвигателя постоянного тока; приобрести практические навыки пуска, эксплуатации и остановки электродвигателя постоянного тока; экспериментально исследовать теоретические сведения о характеристиках электродвигателя постоянного тока.

Основные теоретические положения

Электродвигатель постоянного тока — электрическая машина, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую.

Устройство электродвигателя постоянного тока не имеет отличий от генератора постоянного тока. Это обстоятельство делает электрические машины постоянного тока обратимыми, то есть позволяет их использовать как в генераторном, так и в двигательном режимах. Конструктивно электродвигатель постоянного тока имеет неподвижные и подвижные элементы, которые показаны на рис. 1.

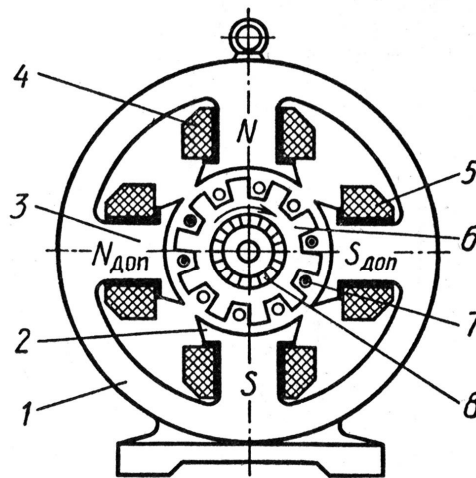


Рис. 1

Неподвижная часть — статор 1 (станина) изготовлен из стального литья, состоит из главных 2 и дополнительных 3 полюсов с обмотками возбуждения 4 и 5 и щеточной траверсой со щетками. Статор выполняет функцию магнитопровода. С помощью главных полюсов создается постоянное во времени и неподвижное в пространстве магнитное поле. Дополнительные полюсы размещаются между главными полюсами и улучшают условия коммутации.

Подвижной частью электродвигателя постоянного тока является ротор 6 (якорь), который размещается на вращающемся вале. Якорь также играет роль магнитопровода. Он набран из тонких, электрически изолированных друг от друга, тонких листов электротехнической стали с повышенным содержанием кремния, что позволяет уменьшить потери мощности. В пазах якоря запрессованы обмотки 7, выводы которых соединяются с пластинами коллектора 8, размещенными на этом же вале электродвигателя (см. рис. 1).

Рассмотрим принцип работы электродвигателя постоянного тока. Подключение постоянного напряжения к зажимам электрической машины вызывает одновременное возникновение в обмотках возбуждения (статора) и в обмотках якоря тока (рис. 2). В результате взаимодействия тока якоря с магнитным потоком, создаваемым обмоткой возбуждения в статоре возникает сила f , определяемая по закону Ампера. Направление этой силы определяется правилом левой руки (рис. 2), согласно которому она ориентируется перпендикулярно как к току i (в обмотке якоря), так и к вектору магнитной индукции B (создаваемой обмоткой возбуждения). В результате на ротор действует пара сил (рис. 2). На верхнюю часть ротора сила действует вправо, на нижнюю – влево. Эта пара сил создает вращающий момент, под действием которого якорь приводится во вращение. Величина возникающего электромагнитного момента оказывается равной

$$M = c_m I_a \Phi,$$

где c_m — коэффициент, зависящий от конструкции обмотки якоря и числа полюсов электродвигателя; Φ — магнитный поток одной пары главных полюсов электродвигателя; I_a — ток якоря двигателя. Как следует из рис. 2, поворот обмоток якоря сопровождается одновременным изменением полярности на коллекторных пластинах. Направление тока в витках обмотки якоря изменяется на противоположное, но магнитный поток обмоток возбуждения сохраняет прежнее направление, что и обуславливает неизменность направления сил f , а значит, и вращательного момента.

Вращение якоря в магнитном поле приводит к появлению в его обмотке ЭДС, направление которой определяется уже по правилу правой руки. В результате для представленной на рис. 2 конфигурации полей и сил в обмотке якоря возникнет индукционный ток, направленный противоположно основному току. Поэтому возникающая ЭДС называется противоЭДС. Величина ее равна

$$E = c_e n \Phi,$$

где n — частота вращения якоря электродвигателя; c_e — коэффициент, зависящий от конструктивных элементов машины. Эта ЭДС ухудшает рабочие характеристики электродвигателя.

Ток в якоре создает магнитное поле, которое воздействует на магнитное поле главных полюсов (статора), что называется реакцией якоря. В режиме холостого хода машины магнитное поле создается только главными полюсами. Это поле симметрично относительно осей этих полюсов и соосно с ними. При подключении к двигателю нагрузки за счет тока в обмотке якоря создается магнитное поле – поле якоря. Ось этого поля будет перпендикулярна оси главных полюсов. Так как при вращении якоря распределение тока в проводниках якоря остается неизменным, то поле якоря остается неподвижным в пространстве. Сложение этого поля с полем главных полюсов дает результирующее поле, которое разворачивается на угол против направления вращения якоря. В итоге уменьшается вращающий момент, так как часть проводников попадает в зону полюса противоположной полярности и создает тормозной момент. При этом происходит искрение щеток и обгорание коллектора, возникает продольное размагничивающее поле.

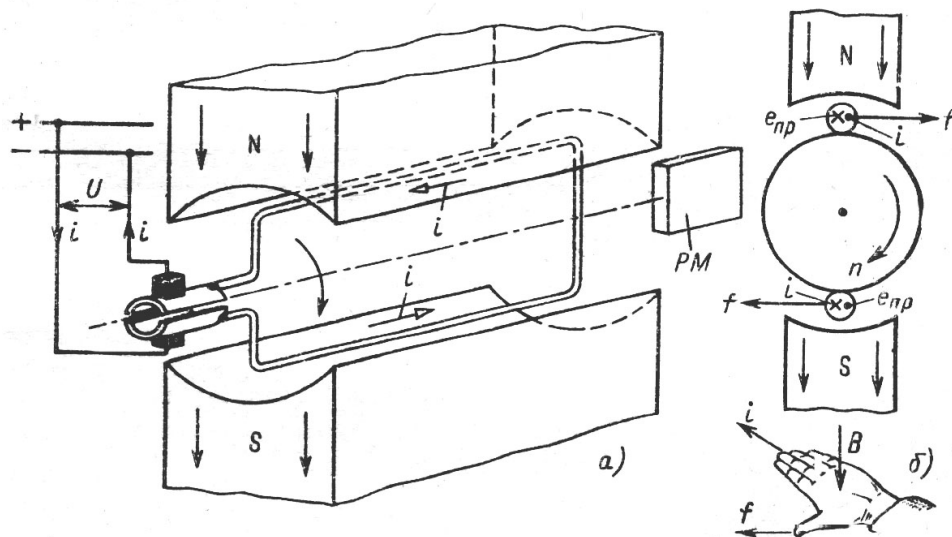


Рис. 2

С целью уменьшения влияния реакции якоря на работу машины в него встраивают дополнительные полюсы. Обмотки таких полюсов включаются последовательно с основной обмоткой якоря, но изменение направление намотки в них вызывает появление магнитного поля, направленного против магнитного поля якоря.

Для изменения направления вращения электродвигателя постоянного тока необходимо изменить полярность напряжения, подводимого к якору или обмотке возбуждения.

В зависимости от способа включения обмотки возбуждения различают электродвигатели постоянного тока с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.

У двигателей с параллельным возбуждением обмотка рассчитана на полное напряжение питающей сети и включается параллельно цепи якоря (рис. 3).

Двигатель с последовательным возбуждением имеет обмотку возбуждения, которая включается последовательно с якорем, поэтому эта обмотка рассчитана на полный ток якоря (рис. 4).

Двигатели со смешанным возбуждением имеют две обмотки, одна включается параллельно, другая — последовательно с якорем (рис. 5).

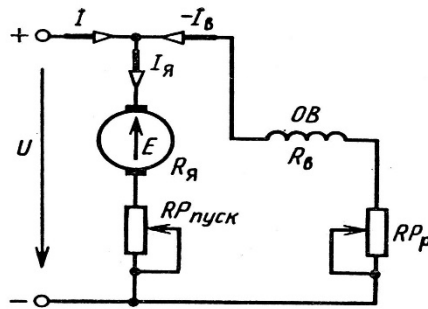


Рис. 3

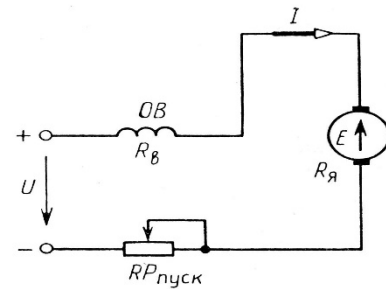


Рис. 4

При пуске электродвигателей постоянного тока (независимо от способа возбуждения) путем прямого включения в питающую сеть возникают значительные пусковые токи, которые могут привести к выходу их из строя. Это происходит в результате выделения значительного количества теплоты в обмотке якоря и последующего нарушения ее изоляции. Поэтому пуск двигателей постоянного тока производится специальными пусковыми приспособлениями. В большинстве случаев для этих целей применяется простейшее пусковое приспособление — пусковой реостат. Процесс пуска электродвигателя постоянного тока с пусковым реостатом показан на примере двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.

Исходя из уравнения, составленного в соответствии со вторым законом Кирхгофа для левой части электрической цепи (см. рис. 3), пусковой реостат полностью выведен ($R_{\text{пуск}} = 0$), ток якоря

$$n = \frac{U - E}{R_{\text{я}}} = \frac{U - c_e n \Phi}{R_{\text{я}}},$$

где U — напряжение, подводимое к электродвигателю; $R_{\text{я}}$ — сопротивление обмотки якоря.

В начальный момент пуска электродвигателя частота вращения якоря $n = 0$, поэтому противоэлектродвижущая сила, наводимая в обмотке якоря, в соответствии с полученным ранее выражением также будет равна нулю ($E = 0$).

Сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}$ — величина довольно малая. Для того чтобы ограничить возможный при этом недопустимо большой ток в цепи якоря при пуске, последовательно с якорем независимо от способа возбуждения двигателя включается пусковой реостат (пусковое сопротивление $R_{\text{пуск}}$). В этом случае пусковой ток якоря

$$I_{\text{я пуск}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{пуск}}}.$$

Сопротивление пускового реостата $R_{\text{пуск}}$ рассчитывают для работы только на время пуска и подбирают таким образом, чтобы пусковой ток якоря электродвигателя не превышал допустимого значения ($I_{\text{я, пуск}} \leq 2I_{\text{я, ном}}$). По мере разгона электродвигателя ЭДС, наводимая в обмотке якоря, вследствие возрастания частоты его вращения n возрастает ($E = c_e n \Phi$). В результате этого ток якоря при прочих равных условиях уменьшается. При этом сопротивление пускового реостата $R_{\text{пуск}}$ по мере разгона якоря электродвигателя необходимо постепенно уменьшать. После окончания разгона двигателя до номинального значения частоты вращения якоря ЭДС возрастает настолько, что пусковое сопротивление может быть сведено к нулю, без опасности значительного возрастания тока якоря.

Таким образом, пусковое сопротивление $R_{\text{пуск}}$ в цепи якоря необходимо только при пуске. В процессе нормальной работы электродвигателя оно должно быть отключено, во-первых, потому, что рассчитано на кратковременную работу во время пуска, во-вторых, при наличии пускового сопротивления в нем будут возникать тепловые потери мощности, равные $R_{\text{пуск}} I_{\text{я}}^2$, существенно снижающие КПД электродвигателя.

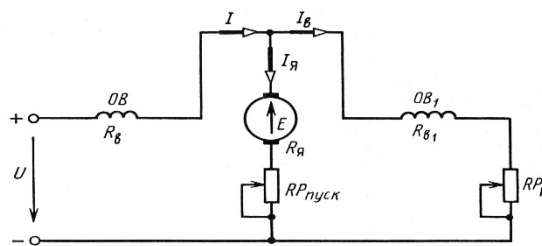


Рис. 5

Для электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением в соответствии со вторым законом Кирхгофа для якорной цепи уравнение электрического равновесия имеет вид

$$E = U - R_{\text{я}} I_{\text{я}}.$$

С учетом выражения для ЭДС ($E = c_e n \Phi$), записав полученную формулу относительно частоты вращения, получаем уравнение частотной (скоростной) характеристики электродвигателя $n(I_{\text{я}})$:

$$n = \frac{U - R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{c_e \Phi} I_{\text{я}}.$$

Из него следует, что при отсутствии нагрузки на валу и токе якоря $I_{\text{я}} = 0$ частота вращения электродвигателя при данном значении питающего напряжения

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} = n_0.$$

Частота вращения электродвигателя n_0 является частотой вращения идеального холостого хода. Кроме параметров электродвигателя она зависит также от значения подводимого напряжения и магнитного потока. С уменьшением магнитного потока при прочих равных условиях частота вращения идеального холостого хода возрастает. Поэтому в случае обрыва цепи обмотки возбуждения, когда ток возбуждения становится равным нулю ($I_{\text{в}} = 0$), магнитный поток двигателя снижается до значения, равного значению остаточного магнитного потока $\Phi_{\text{ост}}$. При этом двигатель “идет в разнос”, развивая частоту вращения, на много большую номинальной, что представляет определенную опасность как для двигателя, так и для обслуживающего персонала.

Частотная (скоростная) характеристика электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением $n(I_{\text{я}})$ при постоянном значении магнитного потока $\Phi = \text{const}$ постоянном значении подводимого напряжения $U = \text{const}$ имеет вид прямой (рис. 6).

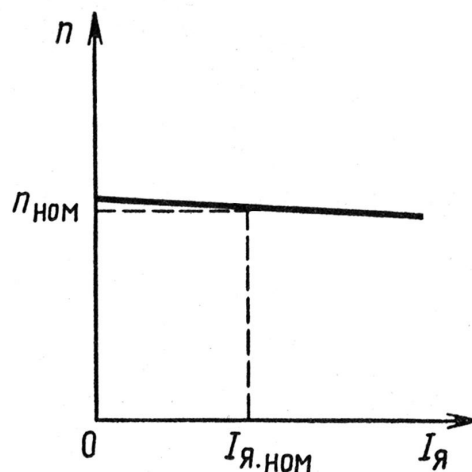


Рис. 6

Из рассмотрения этой характеристики видно, что с увеличением нагрузки на валу, т. е. с увеличением тока якоря $I_{\text{я}}$ частота вращения электродвигателя уменьшается на значение, пропорциональное падению напряжения на сопротивлении цепи якоря $R_{\text{я}}$.

Выражая в уравнениях частотных характеристик ток якоря через электромагнитный момент двигателя $M = c_M I_a \Phi$, получим уравнение механической характеристики, т. е. зависимости $n(M)$ при $U = \text{const}$ для двигателей с параллельным возбуждением:

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{R_a}{c_e c_M \Phi^2} M$$

Пренебрегая влиянием реакции якоря в процессе изменения нагрузки, можно принять электромагнитный момент двигателя пропорциональным току якоря. Поэтому механические характеристики двигателей постоянного тока имеют такой же вид, как и соответствующие частотные характеристики. Электродвигатель с параллельным возбуждением имеет жесткую механическую характеристику (рис. 7). Из этой характеристики видно, что его частота вращения с ростом момента нагрузки снижается незначительно, так как ток возбуждения при параллельном включении обмотки возбуждения и соответственно магнитный поток двигателя остаются практически неизменными, а сопротивление цепи якоря относительно мало.

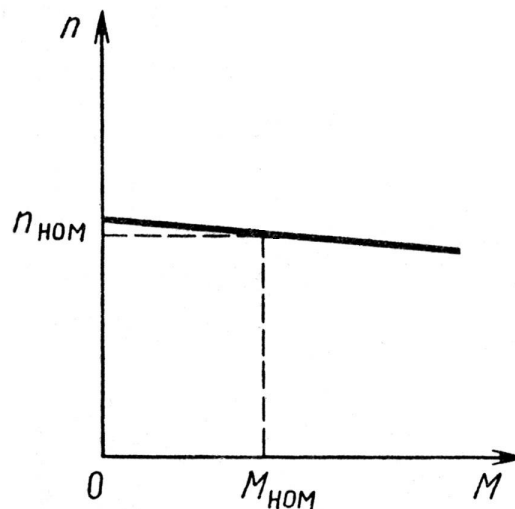


Рис. 7

Рабочие характеристики двигателей постоянного тока представляют собой зависимости частоты вращения n , момента M , тока якоря I_a и КПД (η) от полезной мощности на валу P_2 электродвигателя, т. е. $n(P_2), M(P_2), I_a(P_2), \eta(P_2)$ при неизменном напряжении на его зажимах $U = \text{const}$.

Рабочие характеристики электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением представлены на рис. 8. Из этих характеристик видно, что частота вращения n электродвигателей с параллельным возбуждением с увеличением нагрузки несколько уменьшается. Зависимость полезного момента на валу двигателя от мощности P_2 представляет собой почти прямую линию, так как момент этого двигателя пропорционален

нагрузке на валу: $M=kP_2/n$. Искривление указанной зависимости объясняется некоторым снижением частоты вращения с увеличением нагрузки.

При $P_2=0$ ток, потребляемый электродвигателем, равен току холостого хода. При увеличении мощности ток якоря увеличивается приблизительно по той же зависимости, что и момент нагрузки на валу, так как при условии $\Phi=const$ ток якоря пропорционален моменту нагрузки. КПД электродвигателя определяют как отношение полезной мощности на валу к мощности, потребляемой из сети:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{зя}} + P_{\text{м}} + P_{\text{эв}} + P_{\text{мех}}},$$

где P_2 — полезная мощность на валу; $P_1=UI$ — мощность, потребляемая электродвигателем из питающей сети; $P_{\text{зя}}=I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$ — электрические потери мощности в цепи якоря; $P_{\text{эв}}=UI_{\text{в}} = I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}}$ — электрические потери мощности в цепи возбуждения; $P_{\text{мех}}$ — механические потери мощности; $P_{\text{м}}$ — потери мощности на гистерезис и вихревые токи.

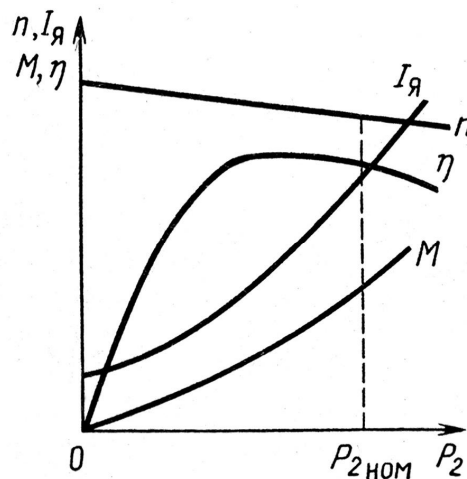


Рис. 8

Важным является также возможность регулирования частоты вращения электродвигателей постоянного тока. Анализ выражений для частотных характеристик показывает, что частоту вращения электродвигателей постоянного тока можно регулировать несколькими способами: включением добавочного сопротивления $R_{\text{доб}}$ в цепь якоря, изменением магнитного потока Φ и изменением напряжения U , подводимого к двигателю.

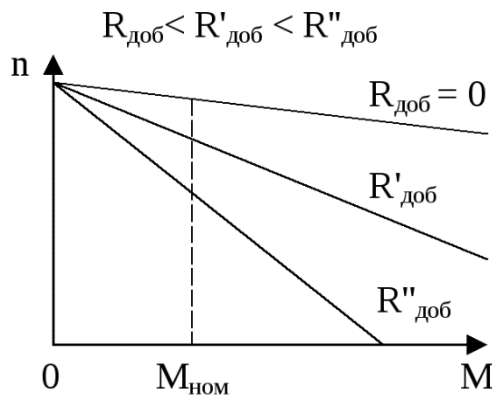


Рис. 9

Одним из наиболее распространенных является способ регулирования частоты вращения включением в цепь якоря электродвигателя добавочного сопротивления. С увеличением сопротивления в цепи якоря при прочих равных условиях происходит снижение частоты вращения. При этом чем больше сопротивление в цепи якоря, тем меньше частота вращения электродвигателя.

При неизменном напряжении питающей сети и неизменном магнитном потоке в процессе изменения значения сопротивления якорной цепи можно получить семейство механических характеристик, например, для электродвигателя с параллельным возбуждением (рис. 9).

Преимущество рассмотренного способа регулирования заключается в его относительной простоте и возможности получить плавное изменение частоты вращения в широких пределах (от нуля до номинального значения частоты $n_{\text{ном}}$). К недостаткам этого способа следует отнести то, что имеют место значительные потери мощности в добавочном сопротивлении, увеличивающиеся с уменьшением частоты вращения, а также необходимость использования дополнительной регулирующей аппаратуры. Кроме того, этот способ не позволяет регулировать частоту вращения электродвигателя вверх от ее номинального значения.

Изменения частоты вращения электродвигателя постоянного тока можно достигнуть и в результате изменения значения магнитного потока возбуждения. При изменении магнитного потока в соответствии с уравнением частотной характеристики для двигателей постоянного тока с параллельным возбуждением при постоянном значении напряжения питающей сети и неизменном значении сопротивления якорной цепи можно получить семейство механических характеристик, представленных на рис. 10.

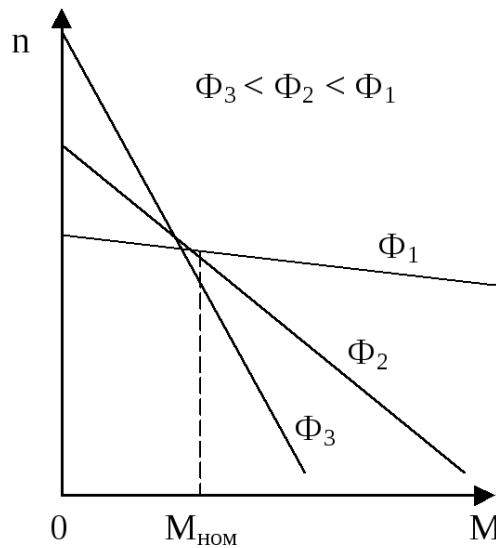


Рис. 10

Как видно из этих характеристик, с уменьшением магнитного потока частота вращения идеального холостого хода электродвигателя n_0 возрастает. Так как при частоте вращения, равной нулю, ток якоря электродвигателя, т. е. пусковой ток, не зависит от магнитного потока, то частотные характеристики семейства не будут параллельны друг другу, причем жесткость характеристик уменьшается с уменьшением магнитного потока (увеличение магнитного потока двигателя обычно не производится, так как при этом ток обмотки возбуждения превышает допустимое, т. е. номинальное, его значение). Таким образом, изменение магнитного потока позволяет регулировать частоту вращения электродвигателя только вверх от номинального ее значения, что является недостатком данного способа регулирования.

К недостаткам этого способа следует отнести также относительно небольшой диапазон регулирования вследствие наличия ограничений по механической прочности и коммутации электродвигателя. Преимуществом данного способа регулирования является его простота. Для двигателей с параллельным возбуждением это достигается изменением сопротивления регулировочного реостата R_p в цепи возбуждения.

У двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением изменение магнитного потока достигается шунтированием обмотки возбуждения сопротивлением, имеющим соответствующее значение, либо замыканием накоротко определенного количества витков обмотки возбуждения.

Широкое применение, особенно в электроприводах, построенных по системе генератор — двигатель, получил способ регулирования частоты вращения путем изменения напряжения на зажимах якоря двигателя. При постоянных магнитном потоке и сопротивлении якорной цепи в результате

изменения напряжения на якоре можно получить семейство частотных характеристик.

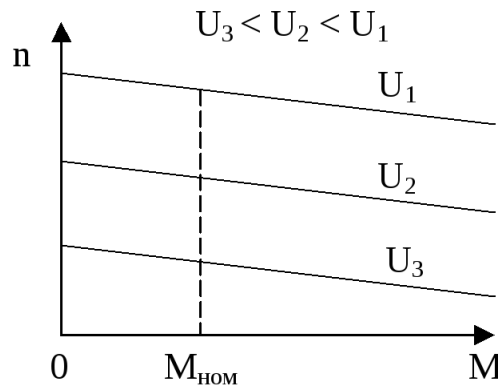


Рис. 11

В качестве примера на рис. 11 представлено такое семейство механических характеристик для электродвигателя с параллельным возбуждением.

С изменением подводимого напряжения частота вращения идеального холостого хода n_0 в соответствии с приведенным ранее выражением изменяется пропорционально напряжению. Так как сопротивление цепи якоря остается неизменным, то жесткость семейства механических характеристик не отличается от жесткости естественной механической характеристики при $U = U_{\text{ном}}$.

Преимуществом рассмотренного способа регулирования является широкий диапазон изменения частоты вращения без увеличения потерь мощности. К недостаткам данного способа следует отнести то, что при этом необходим источник регулируемого питающего напряжения, а это приводит к увеличению массы, габаритов и стоимости установки.

1. Ознакомиться с основными теоретическими положениями и ответить на контрольные вопросы. Ознакомиться на демонстрационном стенде “Машина постоянного тока” с устройством электродвигателя постоянного тока, а на лабораторном стенде — с приборами, аппаратами и подлежащим испытанию электродвигателем. Записать в отчет по лабораторной работе технические паспортные данные двигателя:

Тип электродвигателя П-21

Номинальная мощность, кВт 1,0

Номинальное напряжение, В 220

Номинальная частота вращения, об/мин 3150

Номинальный ток, А 4,5

Номинальный КПД 0,78

2. На рабочей панели стенда “Двигатель постоянного тока” в соответствии с принципиальной схемой рис. 12 собрать электрическую цепь

для снятия характеристик электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения. Монтаж электрической цепи производить согласно монтажной схеме, указанной на рис. 13. В качестве нагрузки на валу испытуемого электродвигателя используется электромагнитный тормоз, тормозной момент которого изменяется при изменении тока в его обмотках возбуждения с помощью регулируемого источника постоянного напряжения. Управление тормозом производится рукояткой “Регулировка нагрузки”, расположенной на панели “Нагрузочные устройства”.

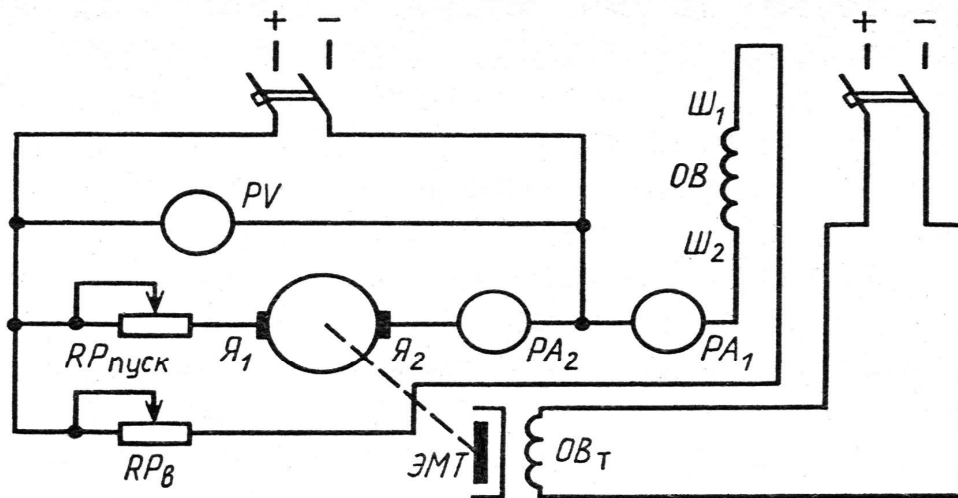


Рис. 12

Перед пуском исследуемого электродвигателя необходимо убедиться в том, что:

а) сопротивление пускового реостата полностью введено (ручка реостата “Пуск двигателя” находится в крайнем левом положении¹, при этом цепь якоря двигателя разомкнута);

б) сопротивление реостата в цепи обмотки возбуждения электродвигателя полностью выведено (ручка реостата “Регулировка возбуждения” находится в крайнем правом положении);

в) напряжение, подводимое к цепи обмотки возбуждения электромагнитного тормоза, равно нулю (ручка “Регулировка нагрузки” находится в крайнем левом положении, кнопка отжата);

г) значение питающего напряжения электродвигателя установлено равным номинальному его значению $U_{ном} = 220$ В. Установка питающего напряжения производится кнопками “↑” и “↓” на панели “Нагрузочные устройства” при предварительно нажатой кнопке “Вкл.” на панели “Машины постоянного тока”:

д) нажатием кнопки “Агрегат № 2” на панели “Нагрузочные устройства” включено напряжение питания

электрической цепи измерения момента и частоты вращения якоря электродвигателя.

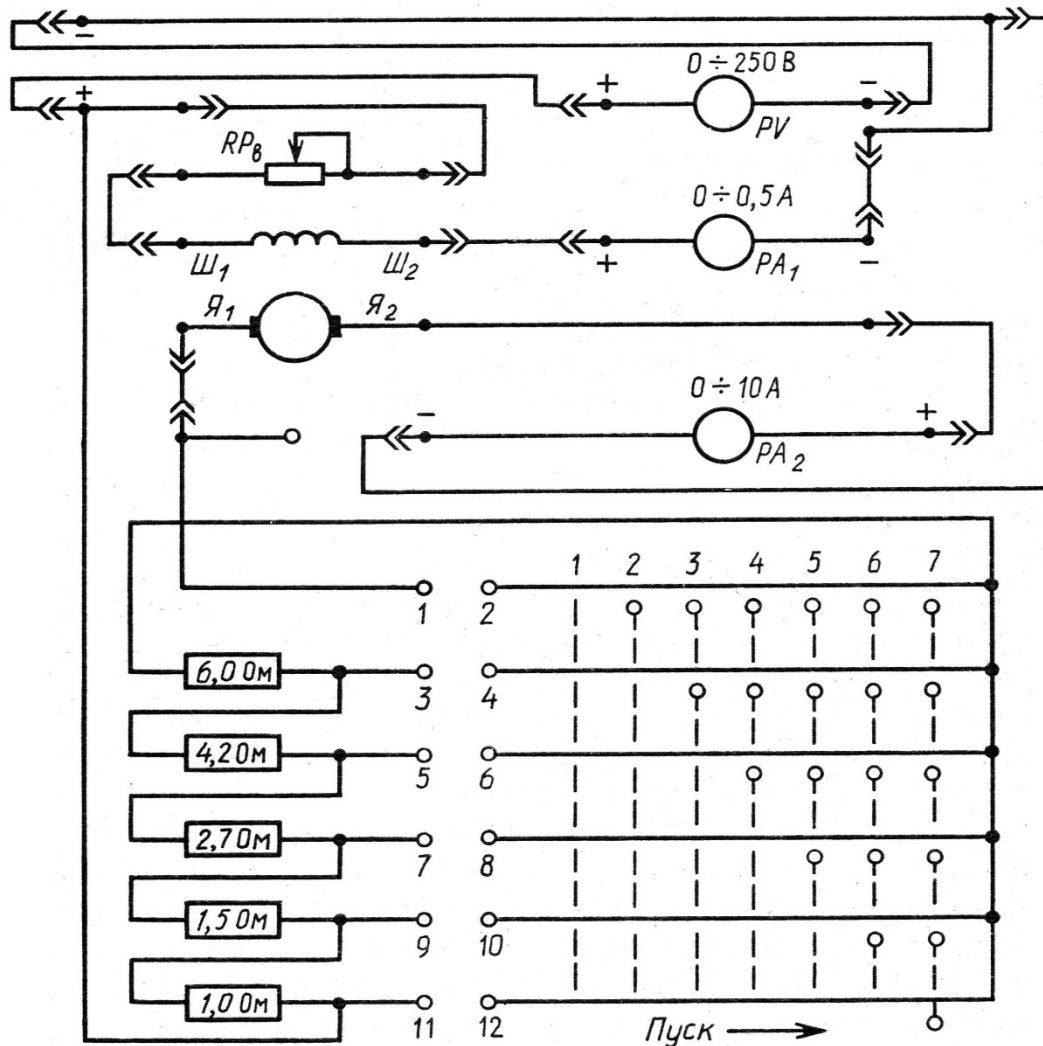


Рис. 13

3. Произвести пуск электродвигателя плавным переключением пускового реостата из положения “1” в положение “7” с выдержкой времени в каждом промежуточном положении в течение 1 секунды.

4. Снять механическую $n(M)$, частотную $n(I_{\text{я}})$ и рабочие характеристики электродвигателя — $M(P_2), n(P_2), I_{\text{я}}(P_2)$ и $\eta(P_2)$ при $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$ и $I_{\text{в}} = I_{\text{в, ном}} = \text{const}$:

4.1. первые точки характеристик снимать при холостом ходе электродвигателя, т. е. при уменьшенном до нуля моменте электромагнитного тормоза;

4.2. осуществить загрузку электродвигателя с помощью электромагнитного тормоза ручкой “Регулировка нагрузки” на панели “Нагрузочные устройства”;

изменение момента электромагнитного тормоза должно производиться плавно;

4.3. постепенно нагружая электродвигатель до значения момента на валу $M=M_{\text{ном}}$, рассчитанного ранее, произвести регистрацию показаний всех измерительных приборов для 5 точек (включая точку номинального режима). Данные наблюдений записать в таблицу.

Измерение момента на валу и частоты вращения якоря электродвигателя производить измерительными приборами (“агрегат № 2”), расположенными на приборной панели.

Номера измерений	Измерения						Вычисления	
	U, В	I _я , А	I _в , А	n, об/мин	M, Н·м	I, А	P ₁ , Вт	P ₂ , Вт
1								
2								
...								

5. Перед отключением двигателя ручку "Регулировка нагрузки" вывести в крайнее левое положение, при этом момент $M = 0$.

Отключить двигатель, нажав кнопку "Выкл." на панели “Машины постоянного тока”, затем вывести пусковой реостат в положение "1".

6. Обработать результаты измерений:

6.1. по результатам измерений п. 4 построить механическую $\omega(M)$ и частотную $\omega(I_{\text{я}})$ характеристики электродвигателя;

6.2. по результатам измерений и вычислений п. 4 построить в одной координатной системе рабочие характеристики двигателя, т.е. зависимости момента M , частоты вращения якоря n , тока якоря $I_{\text{я}}$ и КПД η от полезной мощности P_2 на валу электродвигателя.

Формулы для расчетов величин:

тока, потребляемого электродвигателем,

$$I = I_{\text{я}} + I_{\text{в}},$$

мощности, потребляемой электродвигателем,

$$P_1 = UI,$$

полезной мощности на валу электродвигателя

$$P_2 = 0,105Mn,$$

где M — момент, Н·м; n — частота вращения якоря, об/мин;

коэффициента полезного действия электродвигателя

$$\eta = P_2/P_1.$$

Контрольные вопросы

1. Объясните устройство и принцип действия электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.
2. Начертите схему электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением с пусковой и регулирующей аппаратурой и поясните назначение всех входящих в схему элементов.
3. Почему при уменьшении тока возбуждения электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением частота вращения его якоря возрастает?
4. Как изменить направление вращения электродвигателей постоянного тока с параллельным и последовательным возбуждением?
5. Почему у электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением с увеличением момента нагрузки на валу возрастает ток якоря?
6. Почему после окончания пуска электродвигателей постоянного тока пусковой реостат должен быть выведен полностью?
7. Перечислите способы регулирования частоты вращения электродвигателя постоянного тока.
8. Какое влияние на работу электродвигателей постоянного тока с параллельным и смешанным возбуждением оказывает обрыв параллельной обмотки возбуждения?
9. Что такое реакция якоря? Способы уменьшения реакции якоря.

Библиографический список рекомендуемых источников

Основные источники:

1. Алиев И.И. Электротехника и электрооборудование [Электронный ресурс]: справочник. Учебное пособие для вузов/ Алиев И.И.— Электрон. текстовые данные.— Саратов: Вузовское образование, 2014.— 1199 с..
<http://www.iprbookshop.ru/9654>
2. Электротехника : учебник / С.М. Аполлонский. — Москва : КноРус, 2018. — 292 с. — Для СПО. — ISBN 978-5-406-05899-2.
<https://www.book.ru/book/928016>

Дополнительные источники:

1. Фриск В.В. Основы теории цепей. Сборник задач с примерами применения персонального компьютера / Фриск В.В. - М: СОЛОН-ПРЕСС, 2003. - 192 с. . 6 экз.
2. Сборник задач и практикум по основам теории цепей: [Гриф] / Старостенко А.В., Беянин А.Н., Бычков Ю.А. и др.; под ред. Ю.А. Бычкова, В.М. Залотницкого, Э.П. Чернышова - СПб.: Питер, 2004. - 304с.. 8 экз.