

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Для схемы **1Ф1Н1П** с индуктивной нагрузкой при угле управления $\alpha = 0^\circ$ дифференциальное уравнение схемы может быть записано в виде:

$$U_d = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t = L_d \frac{di_d}{dt}.$$

Начальным условием является $i_d = 0$ при $t = 0$.

Решение уравнения:

$$i_d = \frac{\sqrt{2}U_2}{\omega L_d} (1 - \cos \omega t).$$

Среднее значение тока равно:

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sqrt{2}U_2}{\omega L_d} (1 - \cos \omega t) d\omega t.$$

При угле управления $\alpha \neq 0^\circ$ ($i_d = 0$ в момент $t = \alpha / \omega$)

$$i_d = \frac{\sqrt{2}U_2}{\omega L_d} (\cos \alpha - \cos \omega t).$$

Среднее значение тока равно:

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha_{\text{ВЫКЛ}}} \frac{\sqrt{2}U_2}{\omega L_d} (\cos \alpha - \cos \omega t) d\omega t =$$

$$\frac{\sqrt{2}U_2}{2\pi \omega L_d} [(\alpha_{\text{ВЫКЛ}} - \alpha) \cos \alpha + (\sin \alpha - \sin \alpha_{\text{ВЫКЛ}})].$$

Среднее значение выпрямленного напряжения:

$$U_d = \sqrt{2}U_2 \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha.$$

Для схемы **1Ф1Н2П** действующее значение тока в каждой из вентильных полуобмоток

$$I_{21} = I_{22} = \frac{I_d}{\sqrt{m}}.$$

Мощность вентильной обмотки:

$$S_2 = S_{21} + S_{22} = 2U_2 \frac{I_d}{\sqrt{m}}.$$

Действующее значение тока сетевой обмотки

$$I_1 = k_{\text{тр}} I_d.$$

Мощность сетевой обмотки

$$S_1 = U_1 I_1.$$

Расчетная мощность трансформатора

$$S_{\text{тр}} = \frac{S_1 + S_2}{2}.$$

Среднее значение напряжения с учетом коммутации равно:

$$U_d = \sqrt{2} U_2 \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha - \frac{I_d \omega L_\gamma}{2\pi/m}.$$

$$U_d = I_d R_d.$$

Решив эти уравнения, получим:

$$I_d = \frac{2\sqrt{2} U_2 \cos \alpha}{\pi R_d + \omega L_\gamma}.$$

Угол коммутации может быть найден из соотношения:

$$\cos(\alpha + \gamma) = \cos \alpha - \frac{I_d \omega L_\gamma}{\sqrt{2} U_2 \sin \pi/m},$$

где m – число пульсаций за период.

Среднее значение выпрямленного напряжения в режиме прерывистой проводимости преобразователя равно:

$$U_d = E_d + I_d R_d;$$

$$U_d = \frac{\sqrt{2} U_2}{2\pi/m} \left[\sin \left(\alpha_{\text{ВЫКЛ}} - \frac{\pi}{m} \right) - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{m} \right) \right] + E_d \left(1 - \frac{\alpha_{\text{ВЫКЛ}} - \alpha}{2\pi/m} \right);$$

$$\alpha = \arcsin \frac{E_d}{\sqrt{2} U_2}.$$

Коэффициент мощности λ для схемы **1Ф1Н2П** неуправляемого преобразователя может быть найден из равенства:

$$U_1 I_1 \lambda = U_d I_d,$$

$$\lambda = v \cos \varphi,$$

где v - коэффициент искажения тока сетевой обмотки трансформатора.

Поскольку

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_1$$

и $I_1 = I_d$, то находим:

$$\lambda = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}.$$

Для выпрямителя со схемой соединений **3Ф1НЗП** среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_d = \sqrt{2}U_2 \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha$$

или

$$U_d = \frac{m}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d\omega t.$$

Наибольший допустимый ток нагрузки

$$I_d = mI_{д.ср}.$$

Действующее значение тока тиристора

$$I_T = \frac{\sqrt{\frac{m}{2\pi}} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}U_2 \sin \omega t)^2 d\omega t}{R_d \sqrt{m}}.$$

Наибольшая мощность нагрузки

$$P_d = I_d U_d,$$

Максимальное обратное напряжение диодов

$$U_{обр.макс} = \sqrt{3}\sqrt{2}U_2.$$

Если преобразователь работает на границе между непрерывной и прерывистой проводимостями, тогда среднее значение тока нагрузки

$$I_d = \frac{1}{2\pi/m} \int_{\alpha'}^{\alpha'_{выкл}} i_d d\omega t = \frac{m}{2\pi} \int_{\alpha'}^{\alpha'_{выкл}} \frac{\sqrt{2}U_2}{\omega L_d} (\cos \alpha' - \cos \omega t) d\omega t = \frac{\sqrt{2}U_2}{\omega L_d} \frac{m}{2\pi} \times$$

$$\times [(\alpha'_{выкл} - \alpha) \cos \alpha' + (\sin \alpha' - \sin \alpha'_{выкл})],$$

где при $\alpha' = \omega t$ $i_d = 0$ - начальное условие.

Угол коммутации

$$\gamma = \arccos \left(1 - \frac{I_d X_{\gamma}}{\sqrt{2}U_2 \sin \frac{\pi}{m}} \right).$$

Поправочный коэффициент при учете коммутации находим из графиков, представленных на рис. 1. Например, при $p = 3$, $\alpha = 0$, и полученном $\gamma = 10^\circ$, по кривой $\gamma_0 = 20^\circ$ находим

$$\sqrt{1 - p\psi(\alpha; \gamma)} = 0,99,$$

где

ψ - коэффициент коррекции на коммутацию,

p - постоянная, имеющая различные значения для разных схем, для схемы **3Ф1НЗП** $p=3$. Таким образом действующее значение тока с учетом поправочного коэффициента

$$I_2 = \frac{I_d}{\sqrt{m}} \sqrt{1 - p\psi(\alpha, \gamma)}.$$

Падение напряжения на стороне постоянного тока, которое уравнивается напряжением $E_d + U_d$, есть

$$I_d \left(R_d + \frac{\omega L_\gamma}{\frac{2\pi}{m}} \right).$$

Для инверторного режима угол коммутации γ находится из уравнения

$$\cos(\beta - \gamma) = \cos\beta + \frac{I_d \omega L_\gamma}{\sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m}}.$$

Для преобразователя со схемой соединений **3Ф1НЗП**, имеющей шунтирующий диод, среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_d = \frac{1}{\frac{2\pi}{m}} \int_{\alpha+\gamma_1}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = \frac{3}{2\pi} \sqrt{2} U_2 [1 + \cos(\alpha + \gamma)].$$

Угол коммутации γ_1 определим из уравнения

$$u_{21} = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t = X_\gamma \frac{di_{21}}{d\omega t},$$

при $i_{21} = I_d$, $\omega t = \alpha + \gamma_1$ имеем

$$I_d = \frac{\sqrt{2} U_2}{X_\gamma} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma_1)].$$

Кроме того,

$$I_d = \frac{U_d}{R_d}.$$

Следовательно, для схемы **3Ф1НЗП** имеем

$$\alpha + \gamma_1 = \arccos \frac{2\pi R_d}{2\pi R_d + 3X_\gamma} \left(\cos \alpha - \frac{3}{2\pi} \frac{X_\gamma}{R_d} \right).$$

Зная угол коммутации γ_1 (задний фронт), находим среднее значение тока:

$$I_d = \frac{\sqrt{2} U_2}{X_\gamma} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma_1)]$$

Для определения угла коммутации γ_2 (передний фронт), используем дифференциальное уравнение

$$u_{21} = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t = X_\gamma \frac{di_{21}}{d\omega t},$$

которое с начальным условием $i_{21} = 0$ при $\omega t = \pi + \gamma_2$ имеет решение

$$i_{21} = -\frac{\sqrt{2}U_2}{X_\gamma}(\cos \gamma_2 + \cos \omega t).$$

Поскольку $i_{21} = I_d$ при $\omega t = \pi$, то

$$I_d = -\frac{\sqrt{2}U_2}{X_\gamma}(\cos \gamma_2 + \cos \pi).$$

Так как

$$I_d = \frac{U_d}{R_d},$$

то

$$\gamma_2 = \arccos \left\{ 1 - \frac{3}{2\pi} \frac{X_\gamma}{R_d} [1 + \cos(\alpha + \gamma_1)] \right\}.$$

Для стержневого трансформатора, сетевые обмотки которого соединены в «звезду», а нейтраль выведена, фазные напряжения сетевой обмотки трансформатора u_{11} и u_{12} фиксированы, поэтому по уравнениям:

$$u_{11} = \omega_1 \frac{d\Phi_1}{dt} \quad \text{и} \quad u_{12} = \omega_1 \frac{d\Phi_2}{dt}$$

определяют магнитные потоки Φ_1 , Φ_2 . Уравнение потоков

$$\Phi_3 = -\Phi_1 + \Phi_2,$$

таким образом при отключении фазы 3 u_{23} не изменится.

При выключении вентиля в фазе 3 уравнения равновесия МДС

$$i_{11}\omega_1 - i_{12}\omega_1 = 0;$$

$$i_{11}\omega_1 - i_{23}\omega_2 = 0,$$

следовательно:

$$i_{11} = i_{12} = -i_{23} \frac{\omega_2}{\omega_1}.$$

Для стержневого трансформатора с сетевыми обмотками, соединенными в «звезду», и изолированной нейтралью при отсутствии нагрузки имеем:

$$u_{л1} = u_{11} - u_{12};$$

$$u_{11} = \omega_1 \frac{d\Phi_1}{dt};$$

$$u_{12} = \omega_1 \frac{d\Phi_2}{dt};$$

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0.$$

Принимаем, что магнитная проницаемость μ материала конечна, магнитным сопротивлением ярма можно пренебречь; если l - длина и S - площадь поперечного сечения сердечника, то (рис. 2):

$$H_1 l - H_2 l = \omega_1 i_{11} - \omega_1 i_{12};$$

$$H_1 l - H_3 l = \omega_1 i_{11};$$

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0;$$

$$\Phi_1 = \mu H_1 S$$

$$\Phi_2 = \mu H_2 S;$$

$$\Phi_3 = \mu H_3 S.$$

Решением этой системы уравнений является

$$\phi_1 = -\phi_2; \quad \phi_3 = 0;$$

$$u_{11} = -u_{12}; \quad u_{13} = 0,$$

следовательно:

$$u_{11} = \frac{u_{д1}}{2};$$

$$u_{12} = -\frac{u_{д2}}{2}.$$

Выходное напряжение трехфазной схемы **3Ф1Н3П** равно

$$U_d = \sqrt{2} U_2 \frac{3}{\pi} \sin \frac{\pi}{3}.$$

При отключении одной фазы уравнение принимает вид:

$$U_d = \sqrt{2} U_2 \frac{2}{\pi} \sin \frac{\pi}{2}.$$

При разрыве цепи в одном из плеч трехфазного мостового выпрямителя (**3Ф2Н6П**) (т.е. отключении одного из вентилях), среднее значение напряжения будет:

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{2}{3} U_{d0} \cos \alpha + \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{5\pi}{6}}^{\pi} \sqrt{3} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = \\ &= \frac{2}{3} 2\sqrt{2} U_2 \frac{\sin \frac{\pi}{3}}{\frac{\pi}{3}} \cos \alpha + \frac{\sqrt{2} \sqrt{3}}{2\pi} U_2 \left(-\cos \pi + \cos \frac{5\pi}{6} \right), \quad \text{при } \alpha = 30^\circ. \end{aligned}$$

Зная среднее значение выпрямленного напряжения, находим:

$$I_d = \frac{U_d}{R_d}.$$

При отключении одной из фаз в схеме **3Ф2Н6П** среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{d1\phi} = \sqrt{2}\sqrt{3}U_2 \frac{2}{\pi} \sin \frac{\pi}{2} = 1,56U_2.$$

Таким образом, изменение выпрямленного напряжения составляет

$$\frac{U_{d1\phi} - U_{d3\phi}}{U_{d3\phi}}.$$

Спектр гармоник $n = cm$, где $c = 1, 2, 3 \dots$ - номера гармоник; m - эквивалентное число фаз выпрямления.

Для трехфазного полууправляемого мостового выпрямителя (катодная группа – тиристоры, анодная – диоды) среднее значение выходного напряжения выпрямителя можно определить как сумму средних значений обеих коммутационных групп моста:

$$U_d = U_{d0}(1 + \cos \alpha),$$

где U_{d0} - среднее значение напряжения неуправляемой группы.

При $m = 3$ находим:

$$U_{d0} = \sqrt{2}U_2 \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m},$$

среднее значение выпрямленного напряжения должно быть равно:

$$U_d = I_d R_d = \sqrt{\frac{P_d}{R_d}} R_d = \sqrt{P_d R_d};$$

значит

$$\cos \alpha = \frac{U_d}{U_{d0}} - 1 = 0;$$

среднее значение токов вентиляей

$$I_{т.ср} = I_{д.ср} = \frac{I_d}{3}.$$

Однофазный **трансформатор** при условии, что поток рассеяния трансформатора равен нулю, может быть заменен реактивным сопротивлением, через которое протекает ток намагничивания i_μ . При наличии диода ток вентильной обмотки i_2 является пульсирующим током одного знака. Он может быть разложен на постоянную составляющую I_2 и переменную составляющую $i_{2\sigma}$. Эквивалентная схема однофазного однонаправленного одноимпульсного выпрямителя представлена на рис. 3. Предположим в первом приближении, что токи в двух других ветвях эквивалентной схемы будут иметь ту же самую форму, т.е.

$$i_2 = I_{2ср} + i_{2\sigma};$$

$$i_{\mu} = I_{\mu \text{ ср}} + i_{\mu \sigma};$$

$$i_1 = I_{1 \text{ ср}} + i_{1 \sigma}.$$

Поскольку $i_1 = i_{\mu} + i_2$, то для составляющих токов будут справедливы следующие уравнения:

$$I_{1 \text{ ср}} = I_{\mu \text{ ср}} + I_{2 \text{ ср}};$$

$$i_{1 \sigma} = i_{\mu \sigma} + i_{2 \sigma}.$$

Предполагая, что сердечник трансформатора имеет неограниченно большую магнитную проницаемость и может иметь неограниченно большую магнитную индукцию, получаем $i_{\mu} = 0$, а токи сетевой и вентильной обмоток равными:

$$i_1 = i_2; \quad I_{1 \text{ ср}} = I_{2 \text{ ср}}; \quad i_{1 \sigma} = i_{2 \sigma}.$$

Однако такой идеальный трансформатор очень сильно отличается от любого реального трансформатора. Это видно из рассмотрения уравнений напряжений

$$u_1 = i_1 R_1 + u_2.$$

Напряжение u_2 возникает при изменении во времени потокосцепления обмотки:

$$U_2 = \frac{d\Psi}{dt}.$$

Ток сетевой обмотки содержит постоянную составляющую. В цепи нет источника постоянного напряжения, поэтому постоянная составляющая тока может быть скомпенсирована только за счет постоянной составляющей индуцированного напряжения $d\Psi/dt$. Из этого следует, что уравнения напряжений можно разделить на уравнения для постоянных и переменных составляющих:

$$0 = I_{1 \text{ ср}} R_1 + \frac{d\Psi_1}{dt};$$

$$u_1 = i_{1 \sigma} R_1 + \frac{d\Psi_{\sigma}}{dt},$$

где Ψ_1 обозначает ту часть потокосцепления обмотки трансформатора, которая изменяется линейно во времени (т.е. индуцирует постоянное напряжение), а Ψ_{σ} обозначает ту часть потокосцепления, которая вызывает появление переменного напряжения. Так как первая составляющая потокосцепления изменяется с постоянной скоростью, то

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = -I_{1 \text{ ср}} R_1 = \text{const}.$$

В действительности сердечник трансформатора имеет ограниченную насыщением стали магнитную индукцию. Идеальная кривая намагничивания с учетом насыщения ближе соответствует действительной кривой намагничивания, нетрудно видеть, что описанная выше работа трансформатора с нагрузкой, состоящей из однонаправленного выпрямителя, невозможна. Насыщение сердечника не позволяет потокоцеплению выходить за пределы Ψ_2 или $-\Psi_2$. Следовательно, при насыщении трансформатора должно выполняться следующее условие:

$$I_{1cp} R_1 = 0.$$

Поскольку по условию задачи сопротивлением R_1 нельзя пренебречь, то только I_{1cp} может быть равно нулю, т.е. через сетевую обмотку трансформатора будет протекать только переменный ток. Таким образом, уравнения для токов при насыщении трансформатора примут вид:

$$\begin{aligned} I_{\mu cp} &= -I_{2cp}; \\ i_{1\sigma} &= i_{\mu\sigma} + i_{2\sigma}. \end{aligned}$$

Отсюда видно, апериодическая составляющая тока намагничивания трансформатора с насыщающимся сердечником и нагрузкой, состоящей из однонаправленного выпрямителя, будет равна среднему значению тока выпрямителя, т.е. появится МДС, приводящая к одностороннему намагничиванию сердечника трансформатора.

В установившемся режиме изменение магнитного потока за период равно нулю:

$$\int_0^{\xi/\omega} \frac{d\Psi}{dt} d\tau = \int_{-\Psi_2}^{-\Psi_2} d\Psi = 0,$$

и, следовательно, равен нулю интеграл напряжения на вентильной обмотке:

$$\int_0^{\xi/\omega} u_2 d\tau = \int_0^{\pi/\omega} \sqrt{2} U_1 \frac{R_2}{R_2 + R_1} \sin \omega \tau d\tau + \int_{\pi/\omega}^{\xi/\omega} U_1 \sin \omega \tau d\omega = 0.$$

После интегрирования и преобразования получаем:

$$\cos \xi = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1}; \quad \xi = \arccos \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1}.$$

Среднее значение тока намагничивания равно:

$$I_{\mu cp} = \frac{1}{2\pi} \int_{\xi}^{2\pi} \frac{\sqrt{2} U_1}{R_1} \sin \omega \tau d\tau = \frac{\sqrt{2} U_1}{2\pi R_1} (-1 + \cos \xi),$$

т.е.

$$I_{\mu \text{ ср}} = -\frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_1}{R_2 + R_1}.$$

Теперь из

$$I_{2 \text{ ср}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_1}{R_2 + R_1}$$

получаем, что $I_{\mu \text{ сс}} = -I_{2 \text{ ср}}$, т.е. $I_{1 \text{ ср}} = 0$.

Далее найдем действующее значение тока i_1 . Имеем:

$$I_1^2 = \frac{i}{2} \left[\int_0^\pi \left(\frac{\sqrt{2}U_1}{R_2 + R_1} \right)^2 \sin^2 \omega \tau d\tau + \int_\xi^{2\pi} \left(\frac{\sqrt{2}U_1}{R_1} \right)^2 \sin^2 \omega \tau d\tau \right].$$

Интегрируя, получаем:

$$I_1^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{\sqrt{2}U_1}{R_2 + R_1} \right)^2 + \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\sqrt{2}U_1}{R_1} \right)^2 (2 - \xi + \sin \xi \cos \xi).$$

Для малых углов $\theta \approx \sin \theta$. По определению $2\pi - \xi = \theta$ (в течение угла θ сердечник трансформатора в насыщении). Подставляя $\sin \xi = -\sin \theta$ и преобразуя, получаем:

$$I_1 = \frac{U_1^2}{2(R_2 + R_1)^2} \sqrt{1 + \frac{2 \sin \theta (R_2 + R_1)}{\pi R_1}}.$$

Поскольку

$$\sin \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \xi} = \sqrt{1 - \left(\frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \right)^2}$$

и

$$I_2 = \frac{\sqrt{2}U_1}{2(R_2 + R_1)},$$

после некоторых преобразований найдем:

$$I_1 \approx I_2 \sqrt{1 + \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}}.$$

Видно, что действующее значение тока сетевой обмотки в результате одностороннего намагничивания увеличивается. Например, если $R_2 = 50R_1$, то $I_1 \approx 3I_2$. Ситуация в реальном трансформаторе лучше, так как в нем магнитный поток продолжает изменяться и за изгибом петли гистерезиса. Это означает, что к трансформатору продолжает прикладываться напряжение и тем самым ограничивает рост намагничивания.

Вследствие одностороннего намагничивания трансформатора схема 1Ф1Н1П применяется только в слаботочной технике.

В **броневом трансформаторе**, питающем выпрямитель со схемой соединений 1Ф1Н2П, сетевая и вентильные обмотки расположены на одном и том же стержне магнитопровода (рис. 4). Кривая тока вентильных обмоток имеет форму прямоугольного импульса (при условии, что нагрузка выпрямителя $L_d \rightarrow \infty$). Результирующая МДС в среднем стержне будет:

$$F_0 = i_1 \omega_1 + i_{21} \omega_2 - i_{22} \omega_2,$$

т.е.

$$i_1 = \frac{\omega_2}{\omega_1} (i_{22} - i_{21}) + \frac{F_0}{\omega_1}.$$

Поскольку ток $i_{22} - i_{21}$ переменный, условие $I_{1cp} = 0$ удовлетворяется только для случая, когда $F_0 = 0$ (см. выше). Соответственно кривая тока i_1 имеет прямоугольную форму.

Расчетная мощность трансформатора определяется следующим образом:

$$I_{21} = I_{22} = \frac{I_d}{\sqrt{2}};$$

$$U_{21} = U_{22} = U_1 \frac{\omega_2}{\omega_1};$$

$$I_1 = I_d \frac{\omega_2}{\omega_1};$$

$$S_2 = U_{21} I_{21} + U_{22} I_{22} = \sqrt{2} \frac{\omega_2}{\omega_1} U_1 I_d;$$

$$S_1 = U_1 I_1 = \frac{\omega_2}{\omega_1} U_1 I_d;$$

$$S = \frac{1}{2} (S_2 + S_1) = \frac{\omega_2}{\omega_1} U_1 I_d \frac{1 + \sqrt{2}}{2}.$$

Поскольку

$$U_1 = \frac{\omega_1}{\omega_2} U_2 = \frac{\omega_1}{\omega_2} \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d$$

и

$$U_d I_d = P_d,$$

то находим:

$$S = \pi \frac{1 + \sqrt{2}}{4\sqrt{2}} P_d = 1,34 P_d.$$

В **стержневом трансформаторе** обмотки располагаются на двух отдельных стержнях магнитопровода (рис. 5). Кривые токов вентильной

обмотки такие же, как и в случае применения броневого трансформатора. Для того, чтобы найти ток сетевой обмотки, записываются выражения для МДС в стержнях (МДС в ярмах можно пренебречь):

$$\left. \begin{aligned} F_{01} &= -i_1 \frac{\omega_1}{2} + i_{21} \omega_2; \\ F_{02} &= i_1 \frac{\omega_1}{2} + i_{22} \omega_2; \\ F_{01} &= F_{02} = F_0. \end{aligned} \right\}$$

Эта система уравнений решается следующим образом:

$$F_0 = \omega_2 \frac{i_{21} + i_{22}}{2} = \omega_2 \frac{I_d}{2};$$

$$i_1 = \frac{\omega_2}{\omega_1} (i_{21} - i_{22}).$$

Построив на основе этого уравнения зависимость тока сетевой обмотки от времени, можно получить также МДС одностороннего намагничивания путем последовательных вычислений МДС в стержнях магнитопровода от одного полупериода к другому.

Расчетная мощность трансформатора вычисляется следующим образом:

$$I_{21} = I_{22} = \frac{I_d}{2}; \quad I_1 = I_d \frac{\omega_2}{\omega_1};$$

$$U_{21} = U_{22} = \frac{U_1}{2} \frac{\omega_2}{\omega_1} = U_1 \frac{\omega_2}{\omega_1};$$

$$u_{11} = u_{12} = \frac{u_1}{2};$$

$$S_2 = 2U_{21}I_{21} = \sqrt{2} \frac{\omega_2}{\omega_1} U_1 I_d;$$

$$S_1 = 2U_{11}I_d = \frac{\omega_2}{\omega_1} U_1 I_d.$$

Поскольку

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{\omega_2}{\omega_1} \frac{U_1}{2},$$

имеем:

$$U_1 = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d,$$

подставив $P_d = U_d I_d$, получим:

$$S = \pi \frac{1 + \sqrt{2}}{4\sqrt{2}} P_d = 1,34 P_2.$$

Таким образом, расчетные мощности броневое и стержневого трансформатора одинаковы. Однако стержневой трансформатор не может применяться из-за значительного одностороннего намагничивания.

Для исключения одностороннего намагничивания **вентильные обмотки** соединяют **по схеме «зигзаг»** (рис. 6). Запишем уравнения МДС для стержня 1 магнитопровода:

$$F_0 = -i_1 \omega_1 - i_{22} \omega_2 + i_{21} \omega_2,$$

и для стержня 2 магнитопровода

$$F_0 = i_1 \omega_1 + i_{22} \omega_2 - i_{21} \omega_2.$$

Решив эти уравнения, получим $F_0 = 0$, а для тока сетевой обмотки – только переменную составляющую:

$$i_1 = \frac{\omega_2}{\omega_1} (i_{21} - i_{22}).$$

В данном случае расчетная мощность трансформатора $S = 1,34 P_d$.

Таким образом, переменная МДС исключает нежелательное одностороннее намагничивание магнитопровода трансформатора, питающего выпрямитель с однонаправленной схемой.

Для выпрямителя со схемой соединений 3Ф1НЗП с трансформатором, **обмотки** которого соединены **по схеме «звезда-звезда»** (рис. 7) МДС в стержнях магнитопровода, пренебрегая МДС в ярмах и МДС холостого хода, равны МДС одностороннего намагничивания F_0 и одинаковы для всех стержней:

$$F_0 = \omega_2 i_{21} - \omega_1 i_{11};$$

$$F_0 = \omega_2 i_{22} - \omega_1 i_{12};$$

$$F_0 = \omega_2 i_{23} - \omega_1 i_{13}.$$

Уравнение токов

$$i_{11} + i_{12} + i_{13} = i_0,$$

где i_0 - ток нейтрали.

Эти четыре уравнения содержат пять неизвестных. Пятое уравнение может быть составлено на основании следующих рассуждений.

Ток через нулевой провод может протекать только в том случае, если токи сетевых обмоток содержат гармоники с номерами, кратными трем. Так как сеть дает напряжение промышленной частоты и предполагается, что трансформатор – линейный элемент, то любая гармоника в токах сетевых обмоток появляется в результате работы вентилей, присоединенных к

1. Однофазный однонаправленный однопульсный управляемый выпрямитель (1Ф1Н1П) работает на индуктивную нагрузку $L_d = 20$ мГн. Преобразовательный трансформатор идеален, напряжение вентильной обмотки трансформатора $U_2 = 100$ В. Определить средние значения токов нагрузки для углов управления $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 60^\circ$.
2. Построить кривые токов i_d, i_{21}, i_{22} и i_1 в схеме 1Ф1Н2П преобразователя (рис. 1), и сопоставить их с кривой напряжения U_1 . Определить расчетную мощность трансформатора $S_{тр}$ при указанных условиях работы. Дано: $U_1 = 100$ В, $f = 50$ Гц, коэффициент трансформации 1:1, $R_d = 10$ Ом, $\alpha = 45^\circ$, $L_d \approx \infty$, $L_\gamma = 0$. Трансформатор и вентили идеальные.
3. Построить кривые токов i_d, i_{11}, i_{22} и i_1 и напряжения U_d для преобразователя со схемой 1Ф1Н2П (рис. 1), и сопоставить их с кривой напряжения u_1 . Определить среднее значение тока нагрузки. Дано: $U_1 = 100$ В, $f = 50$ Гц, $k_{тр} = 1$, $R_d = 10$ Ом, $L_d \approx \infty$. Индуктивность трансформатора $L_\gamma = 10$ мГн. Полупроводниковые вентили одинаковые, $\alpha = 45^\circ$.
4. Определить среднее значение напряжения U_d в схеме на рис. 2, если $U_1 = U_{21} = U_{22} = 100$ В, $E_d = 70,5$ В и а) $\alpha = 0^\circ$, б) $\alpha = 90^\circ$. Ширина импульса равна 60° . Трансформатор и вентили идеальные.
5. Построить кривые и определить значения выпрямленного напряжения, выпрямленного тока и токов сетевой и вентильной обмоток преобразовательного трансформатора в схеме 1Ф1Н2П, показанной на рис. 3. Трансформатор и вентили идеальные, $k_{тр} = 1$, $U_2 = U_{21}$, $U_{22} = 100$ В, $E_d = 200$ В, $R_d = 1$ Ом, $L_d \approx \infty$, $\alpha = 150^\circ$.
6. Резистор с сопротивлением $R_d = 0,2$ Ом и сглаживающий реактор с индуктивностью $L_d \approx \infty$ присоединены к цепи постоянного тока преобразователя со схемой соединений 1Ф1Н2П, работающего в инверторном режиме (рис. 4). Какой угол управления должен быть установлен, чтобы противоЭДС источника постоянного тока равнялась $E_d = 180$ В, среднее значение выпрямленного тока было 200 А? Напряжение вентильной полуобмотки трансформатора $U_2 = 200$ В, $f = 50$ Гц, индуктивность коммутации $L_\gamma = 1$ мГн, активное сопротивление $R = 0$. Вентили и электрическая монтажная схема идеальные. Построить кривые тока в одном тиристоре и напряжения на его выводах для вычисленного угла управления.
7. Управляемый выпрямитель со схемой соединений 1Ф1Н2П и шунтирующим диодом (рис. 5) работает на нагрузку, состоящую из последовательно соединенных реактора с индуктивностью $L_d \approx \infty$ и резистора с сопротивлением $R_d = 10$ Ом. Действующее значение напряжения вентильной обмотки идеального трансформатора $U_2 = 110$ В, угол управления $\alpha = 30^\circ$. Построить кривые выпрямленного напряжения, токов двух тиристорov и тока шунтирующего диода. Вентили идеальные.
8. Определить значения выпрямленного напряжения и тока преобразователя со схемой соединений 1Ф2Н2П и токов в обмотках трансформатора (рис. 6). Трансформатор и вентили идеальные. Дано: $U_1 = U_2 = 100$ В, $E_d = 50$ В, $R_d = 1$ Ом, $L_d \approx \infty$, $\alpha = 30^\circ$.
9. В полупроводимой схеме, показанной на рис. 7, $\alpha = 60^\circ$, $U_2 = 100$ В, $R_d = 1$ Ом, $L_d \approx \infty$. Трансформатор и вентили идеальные. Построить кривые токов диодов и тиристора. Определить средние и действующие значения этих токов.
10. Определить коэффициент мощности $\lambda, \cos \varphi$, а также коэффициент искажения γ тока сетевой обмотки трансформатора в схеме, показанной на рис. 8, если $k_{тр} = 1$, а) $L_d \approx \infty$, б) $L_d = 0$.

11. Определить допустимые значения выпрямленного напряжения, тока и мощности нагрузки, питаемой выпрямителем со схемой соединений 3Ф1НЗП, если нагрузка состоит только из резистора, допустимое среднее значение тока вентиля 200 А, а допустимое максимальное значение повторяющегося обратного напряжения на диоде $U_{\text{обр.макс}} = 700 \text{ В}$. Выпрямитель не содержит последовательно или параллельно соединенных диодов. Сеть, трансформатор и диоды идеальные.

12. Неуправляемый выпрямитель со схемой соединений 3Ф1НЗП (рис. 9) работает на активную нагрузку. В одной из фаз сработал предохранитель. Построить кривую выпрямленного тока и найти его среднее значение. Найти средние значения токов вентилях в неповрежденных фазах. Вентили и трансформатор идеальные. Дано $R_d = 1 \text{ Ом}$, $U_2 = 100 \text{ В}$.

13. Преобразователь со схемой соединений 3Ф1НЗП работает на активную нагрузку, $R_d = 10 \text{ Ом}$. Действующее значение фазного напряжения вентильных обмоток трансформатора $U_2 = 220 \text{ В}$, угол управления $\alpha = 60^\circ$. Построить кривую тока нагрузки. Определить среднее значение тока нагрузки, а также среднее и действующее значения тока тиристора.

14. Для схемы, показанной на рис. 10, определить средние значения токов нагрузки и вентиля. Построить кривую тока i_d . Дано: $U_2 = 220 \text{ В}$, $L_d = 1 \text{ мГн}$, $\alpha = 90^\circ$, $f = 50 \text{ Гц}$. Тиристоры идеальные.

15. Управляемый идеальный преобразователь со схемой соединений 3Ф1НЗП работает на нагрузку, состоящую из последовательно соединенных активного сопротивления $R_d = 10 \text{ Ом}$ и индуктивности $L_d \approx \infty$. Действующее значение фазного напряжения вентильной обмотки трансформатора $U_2 = 220 \text{ В}$, угол управления $\alpha = 60^\circ$. Построить кривые выпрямленного напряжения и тока тиристора. Определить среднее и действующее значения тока нагрузки и тока тиристора.

16. Неуправляемый преобразователь со схемой соединений 3Ф1НЗП работает на активную нагрузку через сглаживающий реактор с индуктивностью $L_d \approx \infty$. Среднее значение выпрямленного тока $I_d = 100 \text{ А}$. Напряжение вентильной обмотки трансформатора $U_2 = 220 \text{ В}$. Реактивное сопротивление коммутации $X_\gamma = 0,05 \text{ Ом}$. Определить среднее значение выпрямленного напряжения и действующее значение тока вентильной обмотки.

17. Определить средние значения и форму кривой тока нагрузки и тока, проходящего через тиристор преобразователя со схемой соединений 3Ф1НЗП, показанной на рис. 11. Трансформатор и вентили идеальные. Дано: $U_2 = 100 \text{ В}$, $E_d = 70,7 \text{ В}$, $R_d = 1 \text{ Ом}$, $\alpha = 60^\circ$.

18. Двигатель постоянного тока возвращает энергию в сеть через преобразователь со схемой соединений 3Ф1НЗП, работающий в инверторном режиме. Характеристики двигателя: $E_d = 220 \text{ В}$, $R_d = 2 \text{ Ом}$, $L_d \approx \infty$. Характеристики трансформатора: $U_2 = 220 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $L_\gamma = 1 \text{ мГн}$. Вентили идеальные. Найти угол управления, при котором отдаваемая двигателем мощность $P_d = E_d I_d$ равна 5 кВт. Найти действующее значение тока вентильной обмотки трансформатора.

19. Управляемый преобразователь со схемой соединений 3Ф1НЗП работает на нагрузку (рис. 12). Угол управления $\alpha = 150^\circ$. Построить кривые падения напряжения на нагрузке и тока нагрузки. Найти среднее значение тока нагрузки. Трансформатор и вентили идеальные. Дано: $U_2 = 220 \text{ В}$, $R_d = 1 \text{ Ом}$, $L_d = \infty$, $E_d = 200 \text{ В}$.

20. Управляемый преобразователь со схемой соединений 3Ф1НЗП, имеющий шунтирующий диод, работает на нагрузку, состоящую из последовательно соединенных резисторов с сопротивлением $R_d = 2 \text{ Ом}$ и реактора с индуктивностью $L_d = \infty$. Определить среднее значение тока нагрузки и углы коммутации при условии, что фазное напряжение вентильной обмотки преобразовательного трансформатора $U_2 = 220 \text{ В}$, реактивное сопротивление коммутации $X_\gamma = 0,1 \text{ Ом}$, угол управления $\alpha = 60^\circ$. Полупроводниковые вентили идеальные, а индуктивность цепи шунтирующего диода равна нулю.

21. Преобразователь имеет схему соединений 3Ф1НЗП (рис. 13, 14), одна из фаз сетевой обмотки стержневого трансформатора отключается. Трансформатор идеальный. Числа витков сетевой и вентильной обмоток ω_1 и ω_2 . Как изменится значение выпрямленного напряжения в результате отключения, если сетевые обмотки соединены в звезду, а нейтраль: а) выведена, б) изолирована.

22. Трехфазный неуправляемый преобразователь с мостовой схемой соединений (рис. 15) работает на нагрузку, состоящую из последовательно соединенных резистора с сопротивлением R_d и реактора с индуктивностью L_d . Построить кривые выпрямленного напряжения, тока диода и фазного тока. Определить средние и действующие значения тока диода и фазного тока, а также угол коммутации при условии, что $U_2 = 220 \text{ В}$, $X_\gamma = 0,3 \text{ Ом}$, $R_d = 5 \text{ Ом}$, $L_d \approx \infty$. Диоды идеальные, а активное сопротивление трансформатора пренебрежимо мало.

23. Управляемый выпрямитель со схемой соединений 3Ф2Н6П питает резистор с сопротивлением $R_d = 20 \text{ Ом}$ (рис. 16). Действующее значение фазного напряжения вентильной обмотки идеального преобразовательного трансформатора со схемой соединений звезда-звезда $U_2 = 100 \text{ В}$, угол управления $\alpha = 60^\circ$. Ширина управляющих импульсов 65° . Построить кривые выпрямленного напряжения и тока тиристора. Вычислить среднее значение выпрямленного напряжения и среднее значение тока тиристора.

24. Определить среднее значение тока, проходящего через активную нагрузку $R_d = 10 \text{ Ом}$ после срабатывания предохранителя в одном из плеч трехфазного мостового управляемого выпрямителя (рис. 17). Напряжение вентильной обмотки трансформатора $U_2 = 100 \text{ В}$, угол управления $\alpha = 30^\circ$, ширина импульса управления 120° .

25. Одна из фаз трехфазного неуправляемого мостового выпрямителя отключена (рис. 18).

- Какого типа схема соединений получится в результате?
- На сколько снизится выпрямленное напряжение?
- Как это повлияет на спектр гармоник выпрямленного напряжения?

26. Трехфазный управляемый мостовой выпрямитель работает на нагрузку, состоящую из последовательно соединенных резистора с сопротивлением $R_d = 2,25 \text{ Ом}$ и реактора с индуктивностью $L_d = \infty$ при $U_2 = 110 \text{ В}$ и $I_d = 100 \text{ А}$. Определить среднее значение выпрямленного напряжения и ток нагрузки после срабатывания предохранителя в фазе С (рис. 18), при условии, что устройство управления не сместит управляющие импульсы.

27. Преобразователь со схемой соединений 3Ф2Н6П, показанный на рис. 19, работает в инверторном режиме. Построить кривые напряжений на полюсах инвертора и тока тиристорov. Определить среднее значение активной мощности, поступающей в сеть переменного тока, при условии, что $U_2 = 220 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $R_d = 1 \text{ Ом}$, $L_d \approx \infty$, $E_d = 400 \text{ В}$, $\alpha = 120^\circ$, а индуктивность трансформатора: а) $L_\gamma = 0$, б) $L_\gamma = 1 \text{ мГн}$. Активным сопротивлением трансформатора пренебречь, вентили идеальные.

28. Трехфазный полууправляемый мостовой выпрямитель питает активную нагрузку через реактор с индуктивностью $L_d \approx \infty$ (рис. 20). Определить угол управления, если $U_2 = 110$ В, $R_d = 1,285$ Ом, $P_d = 12,85$ кВт. Определить средние и действующие значения токов тиристоров и диодов, а также среднее и действующее значения тока вентильной обмотки трансформатора.

29. Для схемы выпрямителя, показанной на рис. 21, определить среднее значение выпрямленного напряжения и состав гармоник выпрямленного напряжения, если дано, что проводимость непрерывная.

30. Определить среднее значение выпрямленного напряжения для выпрямителя со схемой соединений, показанной на рис. 22, при условии, что проводимость вентилей непрерывная. Трансформатор и диоды идеальные.

31. Рассчитать широтно-импульсный преобразователь с автотрансформаторной коммутацией, работающий на двигатель постоянного тока (рис. 23). Исходные данные: напряжение на входе преобразователя $U_{вх} = 27$ В; максимальное значение тока якоря двигателя 90 А, время записания тиристоров $t_{вос} \leq 20$ мкс.

32. Рассчитать фильтр с нагрузкой в цепи коллектора (рис. 24). Исходные данные: выходное напряжение $U_{ср} = 20$ В; выходной ток $I_{ср} = 0,1$ А; коэффициент пульсаций на выходе фильтра $K_{п(1)} = 0,02$ %; коэффициент пульсаций на входе фильтра $K_{п(1)} = 4$ %; частота пульсаций $f_{п} = 300$ Гц; максимальная температура окружающей среды $t_{окр} = 40$ °С; внутреннее сопротивление выпрямителя $R_{ив} = 15$ Ом; пределы изменения входного напряжения ± 10 %, нагрузка неизменна; выходное сопротивление на частоте 100 Гц $Z_{вых} = 60$ Ом.

33. Рассчитать фильтр с нагрузкой в цепи эмиттера (рис. 25). Исходные данные: выходное напряжение $U_{ср} = 20$ В; выходной ток $I_{ср} = 0,1$ А; коэффициент пульсаций на выходе фильтра $K_{п(1)} = 0,02$ %; коэффициент пульсаций на входе фильтра $K_{п(1)} = 2$ %; максимальная температура окружающей среды $t_{окр} = 40$ °С; внутреннее сопротивление выпрямителя $R_{ив} = 15$ Ом; пределы изменения входного напряжения ± 10 %, нагрузка неизменна; выходное сопротивление на частоте 100 Гц $Z_{вых}$ не более 1,5 Ом; $\eta = 0,8$.

34. Рассчитать однофазный инвертор тока (рис. 26). Исходные данные: напряжение на нагрузке $U_{н} = 150$ В; ток нагрузки $I_{н} = 5$ А; диапазон изменения нагрузки (2-7) А; выходная частота $f = 50$ Гц; коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi = 0,5$.

35. Рассчитать однофазный резонансный последовательный инвертор (рис. 27). Исходные данные: выходная мощность $S_{н} = 900$ ВА; пределы изменения выходной мощности (75-110) %; выходное напряжение $U_{н} = 127$ В; коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi = 0,7$; выходная частота $f = 500$ Гц.

36. Рассчитать однофазный инвертор напряжения (рис. 28). Исходные данные: полная мощность нагрузки по первой гармонике $S_{(1)н} = 400$ ВА; действующее значение напряжения первой гармоники на нагрузке $U_{(1)н} = 40$ В; коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi = 0,3$; напряжение источника питания $U = 100$ В; $f = 500$ Гц.

37. Рассчитать преобразователь с самовозбуждением (рис. 29). Исходные данные: напряжение источника питания $U = 12,6$ В; напряжение на выходной обмотке преобразователя $U_{вых} = 20$ В; ток выходной обмотки преобразователя $I_{вых} = 1$ А; частота преобразования $f = 500$ Гц.

38. Рассчитать трехфазный инвертор напряжения с пофазной коммутацией (рис. 30). Исходные данные: полная мощность нагрузки по первой гармонике $S_{(1)H} = 2$ кВА; линейное напряжение первой гармоники на нагрузке $U_{(1)2L} = 380$ В; коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi = 0,8$; напряжение источника питания $U_{cp} = 100$ В; частота первой гармоники выходного напряжения $f = 50$ Гц; трансформатор инвертора выполнен по схеме Y/Y.

39. Рассчитать транзисторный компенсационный стабилизатор напряжения (рис. 31). Исходные данные: напряжение питающей сети $U_c = 200$ В; частота тока питающей сети $f_c = 50$ Гц; допустимые колебания сетевого напряжения $\pm 10\%$; выходное напряжение $U_{вых} = 20$ В; нагрузочный ток $I_{вых} = 0,3$ А; двойная амплитуда пульсаций на выходе $2U_M = 10$ мВ, коэффициент стабилизации $K_u > 2000$; температура окружающей среды $t_{окр} = 25^\circ\text{C}$; минимальное выходное напряжение $U_{вых.мин} = 19$ В; максимальное выходное напряжение $U_{вых.макс} = 21$ В.

40. Рассчитать управляемый выпрямитель (рис. 32). Исходные данные: выпрямленное напряжение $U_{cp} = 220 \dots 150$ В; выпрямленный ток $I_{cp} = 60$ А; напряжение однофазной питающей сети $U_c = 220$ В; частота тока питающей сети $f_c = 50$ Гц; нагрузкой выпрямителя является обмотка возбуждения двигателя постоянного тока; индуктивность обмотки такова, что ток в ней непрерывен.

41. Неуправляемый выпрямитель со схемой соединений 1Ф1Н2П питает нагрузку, состоящую из активного сопротивления. Напряжение на нагрузке $U_d = 60$ В, ток $I_d = 260$ А. Можно считать, что сеть имеет неограниченную мощность при напряжении $U_1 = 220$ В. Преобразователь должен выдерживать нагрузку $I_{dмакс} = 700$ А длительною 1 с без повреждения элементов при условии, что за перегрузкой следует бестоковая пауза до тех пор, пока элементы не охладятся. Технические данные диодов: номинальный ток при установке диода на теплоотводящий радиатор $I_{ном} = 70$ А (естественное охлаждение) и $I_{ном} = 160$ А (принудительное охлаждение при скорости потока воздуха 6 м/с); допустимое обратное повторяющееся напряжение $U_{обр.п} = 400$ В. Прямая вольт-амперная характеристика диода приведена на рис. 33, а его перегрузочные характеристики показаны на рис. 35. Определить число элементов, необходимое для построения преобразователя при естественном охлаждении и при принудительном. Какие активные сопротивления нужно включить в ветви параллельно соединенных диодов, чтобы обеспечить надежную работу, если подбор диодов по индивидуальным характеристикам невозможен?

42. Какие резисторы для деления тока должны быть использованы в преобразователе, описанном в задаче 41, работающем с естественным охлаждением диодов, если разброс сопротивлений резисторов не менее $\pm 5\%$?

44. Построить трехфазный мостовой управляемый выпрямитель для питания нагрузки $I_{дн} = 4000$ А. Индуктивность нагрузки может считаться бесконечно большой. Преобразователь должен выдерживать длительные перегрузки, равные 20 %. Определить число параллельно соединенных тиристоров. Какие токораспределительные резисторы должны быть использованы, если допуск на разброс их номинальных сопротивлений равен $\pm 5\%$? Какое охлаждение должно быть применено? Прямые характеристики тиристоров приведены на рис. 34, характеристики потерь мощности - на рис. 36, а характеристики допустимой нагрузки в зависимости от температуры корпуса тиристора - на рис. 37. Потери мощности в токораспределительных резисторах не должны превышать потерь мощности в тиристорах. Система охлаждения поддерживает температуру корпуса тиристора равной или меньшей $t_K = 87^\circ\text{C}$, допустимое среднее значение тока тиристора $I_{T,cp} = 280$ А.

43. Какие резисторы для деления тока должны быть применены в преобразователе, описанном в задаче 41, работающем при естественном охлаждении, если из четырех имеющихся и испытанных диодов три соответствуют экстремальной прямой характеристике с минимальным падением напряжения, а четвертый – экстремальной прямой характеристике с максимальным падением напряжения?

45. Управляемый выпрямитель со схемой соединений 3Ф1Н3П работает на нагрузку, состоящую из резистора с сопротивлением R_d и реактора с индуктивностью $L_d = \infty$. Ток нагрузки поддерживается регулятором на уровне $I_d = 450$ А. Схема имеет по два тиристора на фазу, работающих параллельно через магнитосвязанный индуктивный делитель (рис. 38). Прямые характеристики тиристорov показаны на рис. 39. Система охлаждения позволяет нагружать каждый тиристор периодическим током, имеющим форму трапецеидальных импульсов шириной $120^\circ + \gamma$, (γ - угол коммутации) при среднем значении тока $I_{T, \text{ср}} = 80$ А. Определить необходимые параметры делителя.

46. В преобразователе с естественной коммутацией со схемой соединений 3Ф2Н6П в каждом плече имеется шесть тиристорov, соединенных параллельно через трансформаторный делитель тока (рис. 40). Диапазон прямых пороговых напряжений тиристорov находится между $U_{T0\text{макс}} = 0,95$ В и $U_{T0\text{мин}} = 0,7$ В. Номинальный выпрямленный ток преобразователя $I_{dH} = 3000$ А. Цепь постоянного тока включает реактор с индуктивностью $L_d \approx \infty$ и резистор, соединенные последовательно. Реактивные сопротивления рассеяния и активные сопротивления обмоток трансформаторных делителей, а также динамические активные сопротивления тиристорov при вычислениях могут не учитываться. Определить наименьшее значение индуктивности намагничивания трансформаторных делителей, при котором максимальное значение тока в любом тиристоре не будет превышать 120 % значения тока при равномерном его распределении. На рис. 41 представлена эквивалентная цепь плеча.

47. Неуправляемый выпрямитель со схемой соединений 1Ф1Н2П с естественным воздушным охлаждением питает нагрузку, состоящую из последовательно соединенных реактора с индуктивностью $L_d \approx \infty$ и резистора с сопротивлением $R_d = 1$ Ом. Действующее значение напряжения вентильной обмотки преобразовательного трансформатора $U_2 = 110$ В, его реактивное сопротивление коммутации $X_\gamma = 0,05$ Ом. Какие быстродействующие предохранители должны быть соединены последовательно с диодом, чтобы была обеспечена защита от КЗ? Применены диоды со следующими техническими характеристиками: $I_{\text{ном}} = 70$ А. (естественное охлаждение); $U_{\text{обр}} = 700$ В; допустимое значение максимума полусинусоидального импульса тока $I_{\text{к, доп. макс}} = 5300$ А ($t = 10$ мс; $\Theta = 150^\circ\text{C}$); допустимое значение интеграла $\int i^2 dt$ для диодов $\int i^2 dt = 140 \cdot 10^3 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$ ($t = 10$ мс; $\Theta = 150^\circ\text{C}$). Допустимое значение интеграла $\int i^2 dt$ для диодов $\int i^2 dt = 140 \cdot 10^3 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$ ($t = 10$ мс; $\Theta = 150^\circ\text{C}$). Характеристики быстродействующих предохранителей представлены на рис. 42, 43. Влияние охлаждения на ток, который может пропускать предохранитель, учитывается поправочным коэффициентом C_{f1} . Расчетные параметры, необходимые для определения этого коэффициента, следующие: $\alpha = 130$; $B_1 = 1,25$. Наибольшая температура окружающей среды $\Theta_0 = 35^\circ\text{C}$. Допустимое значение $\int i^2 dt$ для диодов зависит от длительности перегрузки (от длительности полусинусоидального импульса тока), как показано на рис. 44.

48. Однофазный преобразователь с мостовой схемой соединений питается от трансформатора мощностью $S_{\text{тр}} = 10 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, присоединенного к сети неограниченной мощности. Напряжение вентильной обмотки трансформатора $U_2 = 200 \text{ В}$, его ток намагничивания равен 3 % номинального тока. Определить параметры защитного устройства от перенапряжений, возникающих при отключении трансформатора, предполагая, что перенапряжение не должно превышать двойного номинального напряжения. Схема защиты состоит из RC -цепочек. Минимальное время между двумя отключениями трансформатора равно 10 с, наименьшая длительность включенного состояния трансформатора между двумя отключениями – 5 с. На рис. 45 показаны относительные значения емкости, а также минимального и максимального сопротивлений в зависимости от коэффициента перенапряжений.

49. Однофазный преобразователь с мостовой схемой соединений питается от трансформатора мощностью $S_{\text{тр}} = 10 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, присоединенного к сети неограниченной мощности. Напряжение вентильной обмотки трансформатора $U_2 = 200 \text{ В}$, его ток намагничивания равен 3 % номинального тока. Определить параметры защитного устройства от перенапряжений, возникающих при отключении трансформатора, предполагая, что перенапряжение не должно превышать двойного номинального напряжения. Схема защиты состоит из RC -цепочки, присоединенной через вспомогательный выпрямитель. Минимальное время между двумя отключениями трансформатора равно 10 с, наименьшая длительность включенного состояния трансформатора между двумя отключениями – 5 с. На рис. 45 показаны относительные значения емкости, а также минимального и максимального сопротивлений в зависимости от коэффициента перенапряжений.

50. Через однофазный прерыватель со встречно-параллельно включенными тиристорами к сети с напряжением $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$ и частотой $f = 50 \text{ Гц}$ присоединен реактор с индуктивностью $L_{\text{н}} = 12 \text{ мГн}$ (рис. 46). Применены тиристоры с номинальным средним значением тока 50 А. Тиристоры работают при естественном воздушном охлаждении с температурой воздуха $\Theta = 45^\circ\text{С}$, при этом допустимое среднее значение тока составляет $I_{\text{ср. доп}} = 30 \text{ А}$. Повторяющиеся напряжения тиристоров $U_{\text{пр.п}} = U_{\text{обр.п}} = 600 \text{ В}$, критические значения скоростей нарастания тока и прямого напряжения $(di/dt)_{\text{кр}} = 25 \text{ А/мкс}$, $(du/dt)_{\text{кр}} = 50 \text{ В/мкс}$. Характеристики запасенного в тиристорах заряда показаны на рис. 47. Отклонения напряжения сети составляют $\pm 10\%$. Коэффициент запаса по напряжению на тиристоре $b = 1,3$. При расчете реактивным сопротивлением сети можно пренебречь. Рассчитать значения R и C демпфирующей цепочки, присоединенной параллельно тиристорам. Определить потери мощности в резисторе R .