

последовательного соединения управляемых вентилях, при котором могут потребоваться очень сложные электрические схемы управления и защиты от сверхтоков и перенапряжений.

Из-за многообразия проблем, затрагиваемых этой темой, нам не удалось так выбрать задачи, чтобы они охватывали все аспекты. Поэтому представлены лишь методы расчета прерывателей переменного тока и даны типичные примеры.

3.2. ЗАДАЧИ ПО ОДНОФАЗНЫМ ПРЕРЫВАТЕЛЯМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Задача 3.1. Однофазный прерыватель переменного тока «тиристор-тиристор» включен в цепь резистора (рис. 3.7). Определить среднее и действующее значения тока тиристоров и нагрузки, а также потери в тиристорах. Построить зависимость коэффициента формы тока тиристора от угла направления.

Вольт-амперная характеристика тиристора определяется формулой

$$u_T = U_{T0} + R_T i_T,$$

где $U_{T0} = 0,8$ В, $R_T = 2$ мОм. Напряжение питания $U = 220$ В, активное сопротивление нагрузки $R = 2$ Ом. Тиристоры имеют симметричное управление; $\alpha = 60^\circ$.

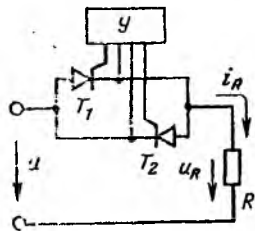


Рис. 3.7. Схема к задаче 3.1.

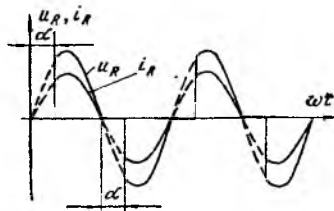


Рис. 3.8. Диаграмма мгновенных значений тока и напряжения на нагрузке в схеме на рис. 3.7.

Решение. На рис. 3.8 показаны кривые напряжения и тока нагрузки. Ток нагрузки пропускается тиристором T_1 в положительный полупериод и тиристором T_2 в отрицательный полупериод. Благодаря симметричности управления среднее $I_{T,cp}$ и действующее I_T значения токов в обоих тиристорах равны:

$$I_{T,cp} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{\sqrt{2}U}{R} \sin \omega t d\omega t = \frac{\sqrt{2}U}{2\pi R} (1 + \cos \alpha) = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{2\pi \cdot 2} (1 + \cos 60^\circ) = 37,2 \text{ А};$$

$$I_T^2 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\sqrt{2}U}{R} \right)^2 \int_0^\pi \sin^2 \omega t d\omega t = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\sqrt{2}U}{R} \right)^2 \times \left[\frac{1}{2} (\pi - \alpha) + \frac{\sin 2\alpha}{4} \right],$$

$$I_T = \frac{U}{R} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right)} = \frac{220}{2} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{3} + \frac{\sin 120^\circ}{2\pi} \right)} = 69,8 \text{ А}.$$

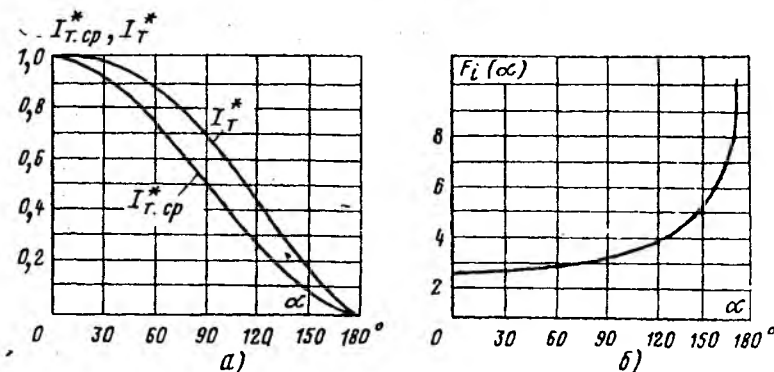


Рис. 3.9. Диаграммы работы однофазного симметричного прерывателя переменного тока с активной нагрузкой.

а — среднее и действующее значения токов тиристоров; б — коэффициент формы тока тиристора.

Используя эти выражения, можно построить зависимость среднего и действующего значений токов тиристоров от угла управления (в отн. ед.):

$$I_{T,cp}^* = \frac{I_{T,cp}}{I_{T,cp0}} = \frac{1 + \cos \alpha}{2},$$

$$I_T^* = \frac{I_T}{I_{T0}} = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}},$$

где $I_{T,cp0}$ и I_{T0} соответствуют углу управления $\alpha = 0$. Характеристики представлены на рис. 3.9, а. На рис. 3.9, б дана зависимость коэффициента формы тока тиристора от угла управления, построенная по выражению

$$F_i(\alpha) = \frac{\pi \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}}{1 + \cos \alpha}.$$

$$K_f = \frac{I_T}{I_{T,cp}}$$

Среднее значение тока нагрузки:

$$I_{\text{ср}}=0,$$

а его действующее значение при угле управления $\alpha=60^\circ$:

$$I_R = \sqrt{2} I_T = \sqrt{2} \cdot 69,8 = 98,8 \text{ А.}$$

Потери в одном тиристоре при $\alpha=60^\circ$:

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} u_T i_T d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{\text{то}} i_T d\omega t + \\ &+ \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} R_T i_T^2 d\omega t = U_{\text{то}} \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} i_T d\omega t + \\ &+ R_T \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} i_T^2 d\omega t = U_{\text{то}} I_{\text{ср}} + R_T I_T^2 = 0,8 \cdot 37,2 + \\ &+ 2 \cdot 10^{-3} \cdot 69,8^2 = 39,52 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

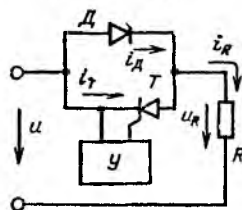


Рис. 3.10. Схема к задаче 3.2.

Задача 3.2. Нагрузкой однофазного прерывателя переменного тока со схемой соединений «тиристор — диод» является резистор (рис. 3.10). Определить средние и действующие значения токов, протекающих через тиристор, диод и нагрузку. Напряжение источника питания $U=110$ В, активное сопротивление нагрузки $R_d=1,5$ Ом, угол управления тиристора $\alpha=90^\circ$.

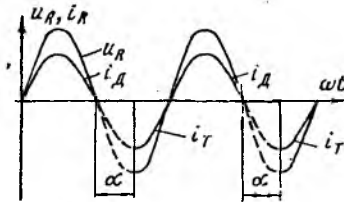


Рис. 3.11. Диаграммы мгновенных значений токов и напряжений в схеме на рис. 3.10.

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{\sqrt{2} U}{R} \sin \omega t d\omega t$$

Решение. Кривые токов, протекающих через тиристор и диод, приведены на рис. 3.11. В соответствии с задачей 3.1

$$I_{\text{ср}} = \frac{\sqrt{2} U}{2\pi R} (1 + \cos \alpha) = \frac{\sqrt{2} 110}{2\pi 1,5} (1 + \cos 90^\circ) = 16,52 \text{ А;}$$

$$\begin{aligned} I_T &= \frac{U}{R} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right)} = \\ &= \frac{110}{1,5} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{2} + \frac{\sin 180^\circ}{2\pi} \right)} = \\ &= \frac{110}{3,05} = 36,7 \text{ А.} \end{aligned}$$

Из рис. 3.11 следует, что

$$I_{\text{д.ср}} = 2I_{\text{т.ср}} = 33,04 \text{ А;}$$

$$I_R = \sqrt{2} I_T = 51,9 \text{ А.}$$

Среднее значение тока нагрузки представляет собой разность средних значений токов диода и тиристора:

$$I_{\text{ср}} = I_{\text{д.ср}} - I_{\text{т.ср}} = 16,52 \text{ А,}$$

а его действующее значение представляет собой среднее геометрическое токов диода и тиристора:

$$I_R = \sqrt{I_{\text{д}}^2 + I_{\text{т}}^2} = 63,5 \text{ А.}$$

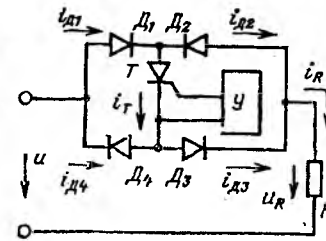


Рис. 3.12. Однофазный мостовой прерыватель переменного тока (задача 3.3).

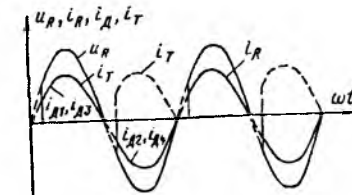


Рис. 3.13. Диаграммы мгновенных значений токов и напряжений в схеме на рис. 3.12.

Задача 3.3. Определить средние и действующие значения токов диодов и тиристора прерывателя со схемой соединений, показанной на рис. 3.12. Угол управления тиристора $\alpha=30^\circ$, $U=110$ В, $R=5$ Ом.

Решение. Ток нагрузки равен току нагрузки в однофазном симметричном управляемом прерывателе переменного тока со схемой соединений «тиристор — тиристор». В положительный полупериод ток

протскает через элементы $D_1-T-D_3-R_T$, а в отрицательной — через элементы $R_T-D_2-T-D_4$ (рис. 3.12 и 3.13). Среднее значение токов диодов

$$I_{д.ср} = \frac{\sqrt{2}U}{2\pi R} (1 + \cos \alpha) = \frac{\sqrt{2}110}{2\pi \cdot 5} (1 + \cos 30^\circ) = 9,26 \text{ А.}$$

Действующее значение токов диодов

$$I_d = \frac{U}{R} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right)} = \frac{110}{5} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{6} + \frac{\sin 60^\circ}{2\pi} \right)} = 15,38 \text{ А.}$$

Среднее значение тока тиристора $I_{т.ср} = 2I_{д.ср} = 18,52 \text{ А}$. Действующее значение тока тиристора $I_T = \sqrt{2}I_d = 21,8 \text{ А}$. Среднее значение тока нагрузки $I_{н.ср} = 0$. Действующее значение тока нагрузки $I_R = I_T = 21,8 \text{ А}$.

Задача 3.4. Однофазный прерыватель переменного тока со схемой соединений «тиристор — тиристор» работает на нагрузку, состоящую из резистора с сопротивлением, изменяющимся в диапазоне $0,2 \text{ Ом} < R < 0,45 \text{ Ом}$ (рис. 3.14). Действующее значение тока нагрузки поддерживается постоянным и равным $I_R = 100 \text{ А}$ при помощи регулятора $У$. Вычислить коэффициент трансформации питающего трансформатора, если угол управления, соответствующий $R_{\max}$, равен $\alpha = 0^\circ$. Напряжение сети 220 В . Трансформатор идеальный. Определить диапазон углов управления и угол управления, при котором потери в тиристорах будут максимальными.

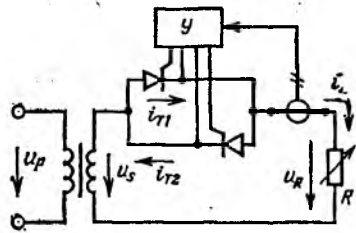


Рис. 3.14. Схема к задаче 3.4.

Решение. Сначала определим требуемый диапазон углов управления. Поскольку угол управления, относящийся к наибольшему значению активного сопротивления, равен нулю, требуемое напряжение вентильной обмотки будет:

$$U_s = I_R R_{\max} = 100 \cdot 0,45 = 45 \text{ В,}$$

а коэффициент трансформации трансформатора

$$k_T = \frac{U_s}{U_p} = \frac{45}{220} = 0,204$$

(падениями напряжения на тиристорах можно пренебречь). Как указывалось в задаче 3.1, действующее значение тока нагрузки в зависимости от угла управления определяется по формуле

$$I_R = \frac{U_s}{R} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}.$$

Максимальный угол управления соответствует сопротивлению $R_{\min}$. В соответствии с условием задачи

$$\frac{I_R R_{\min}}{U_s} = \frac{100 \cdot 0,2}{45} = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} = 0,44.$$

Это уравнение не может быть решено в явном виде относительно α , и поэтому для того чтобы найти решение, нужно либо воспользоваться методом подбора (методом проб и ошибок), либо решить его графически.

На рис. 3.15 показано графическое решение, из которого получаем $\alpha = 120^\circ$, т. е. диапазон угла управления тиристора будет $0^\circ < \alpha < 120^\circ$.

Можно с достаточной степенью точности считать, что при промышленной частоте полные потери в тиристоре равны потерям, возникающим во включенном состоянии:

$$P = U_{т0} I_{т.ср} + R_T I_T^2,$$

где $U_{т0}$ — пороговое напряжение прямой вольт-амперной характеристики; R_T соответствует тангенсу угла ее наклона.

Так как действующее значение тока нагрузки постоянно, то и действующее значение то-

ка тиристора будет постоянно. Используя соотношения из задачи 3.1, получаем:

$$I_{т.ср} = I_T \frac{1 + \cos \alpha}{\pi \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}} = I_T X(\alpha)$$

и, следовательно,

$$P = U_{т0} I_T X(\alpha) + R_T I_T^2,$$

где $X(\alpha)$ — величина, обратная коэффициенту формы кривой тока тиристора:

$$X(\alpha) = \frac{1}{F_i}.$$

Построение функции $X(\alpha)$ показывает, что ее максимум будет при $\alpha = 0$ (рис. 3.16); следовательно, потери в тиристоре будут наибольшими при этом угле управления. Следует подчеркнуть, что, как показывает сравнение с задачей 3.5, это заключение справедливо только в том случае, если действующее значение тока нагрузки будет постоянным.

Задача 3.5. Выпрямитель высокого напряжения, который может регулироваться при помощи прерывателя переменного тока со схемой соединений «тиристор — тиристор», включенного на сетевой стороне трансформатора, работает на активную нагрузку (рис. 3.17).

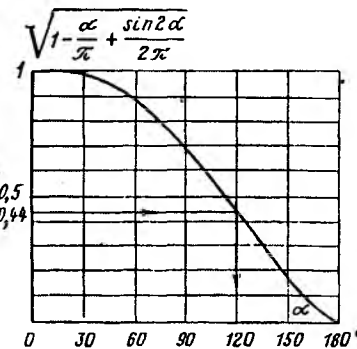


Рис. 3.15. Диаграммы для определения угла управления тиристора при сопротивлении нагрузки $R_{\min}$ в схеме на рис. 3.14.