МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова"

ОДНОФАЗНЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Методические указания к лабораторной работе

Чебоксары 2010

УДК 621.314.58
ББК 31.264.5

Составители: Н.М. Лазарева,
В.М. Яров

Однофазные управляемые выпрямители: метод. указания к лаб. работе / сост. Н.М. Лазарева, В.М. Яров; Чуваш. ун-т. Чебоксары, 2010. 40 с.

Составлены в соответствии с рабочей программой курса «Энергетическая электроника. Содержат описание лабораторной работы по исследованию однофазных управляемых выпрямителей.

Для студентов IV курса специальности 2004 «Промышленная электроника».

Утверждено Методическим советом университета

Ответственный редактор д-р техн. наук, профессор Г.А. Белов

Лабораторная работа ПТ-4

ОДНОФАЗНЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Цель работы: ознакомление с работой однофазных управляемых схем выпрямления; экспериментальная проверка основных соотношений между токами и напряжениями в однофазных схемах выпрямления и регулировочных характеристик; исследование влияния характера нагрузки на регулировочные характеристики, форму напряжений и токов отдельных элементов схем выпрямления; сравнение и оценка режимов работы схем выпрямления при различных углах регулирования.

1. Описание лабораторной установки

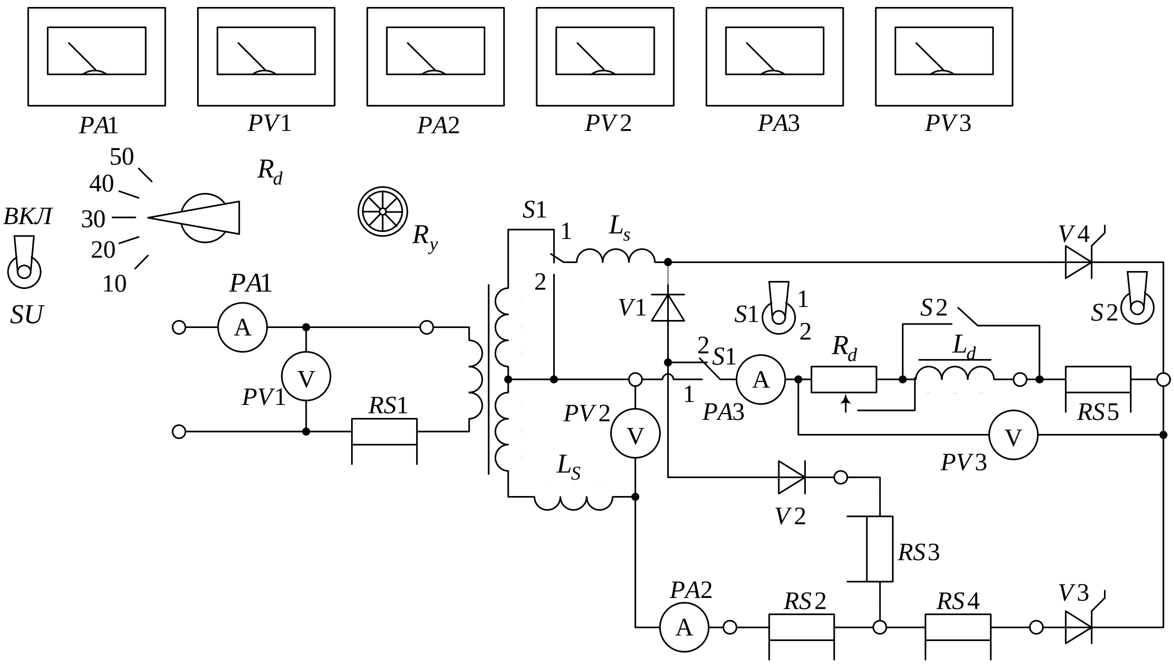

Рис. 1. Панель лабораторного макета

Установка, лицевая панель которой показана на рис. 1, позволяет производить исследование работы двух управляемых схем выпрямления: однофазной двухполупериодной со средней точкой (называемой иногда двухфазной) (рис. 2) и мостовой несимметричной (рис. 3) при активной и активно-индуктивной нагрузках. Включение необходимой схемы и вида нагрузки производится переключателями. Выключатель *SU* служит для подключения исследуемых схем к питающей сети. Изменение и установка необходимого угла регулирования α осуществляется потенциометром R_y системы управления выпрямителя. Контроль и измерение токов и напряжений в первичной и вторичной цепях, а также в цепи постоянного тока производится измерительными приборами, а изменение тока нагрузки реостатом R_d.

2. Теоретические сведения

В большинстве практических случаев выпрямительные установки должны обеспечивать возможность плавного регулирования среднего выпрямленного напряжения U_d. Применение управляемых вентилей вносит ряд существенных особенностей в режим работы выпрямительной схемы: изменяются формы кривых токов и напряжений на элементах выпрямителя, и меняется режим работы вентилей.

2.1. Работа управляемого выпрямителя на активную нагрузку

Общий вид однофазной двухполупериодной схемы с управляемыми вентилями представлен на рис. 2, *а*. Рассмотрим работу схемы на активную нагрузку (ключ *К* на рис. 2, *а* замкнут). Использование в схеме выпрямителя управляемых вентилей позволяет задерживать начало прохождения тока через очередной вступающий в работу вентиль по отношению к моменту его естественного отпирания. В случае использования в схеме рис. 2, *а* неуправляемых вентилей вентиль В1 включился бы в момент времени $\vartheta = 0$ (рис. 2, *б*). Этот момент является моментом естественного включения вентиля В1. Предположим что на управляющий электрод вентиля В1 отпирающий импульс будет подан в момент ϑ_1 (рис. 2, *б*). В этом случае вентиль В1 включится с некоторой задержкой. Угол задержки, отсчитываемый от момента естественного включения вентиля, выраженный в электрических градусах, называется углом управления и обычно обозначается буквой α. В результате в интервале $0 - \vartheta_1$ напряжение на сопротивлении нагрузки R_d будет равно нулю (оба вентиля в закрытом состоянии). При включении вентиля В1 напряжение на нагрузке R_d скачком возрастает и далее будет изменяться по синусоиде фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора.

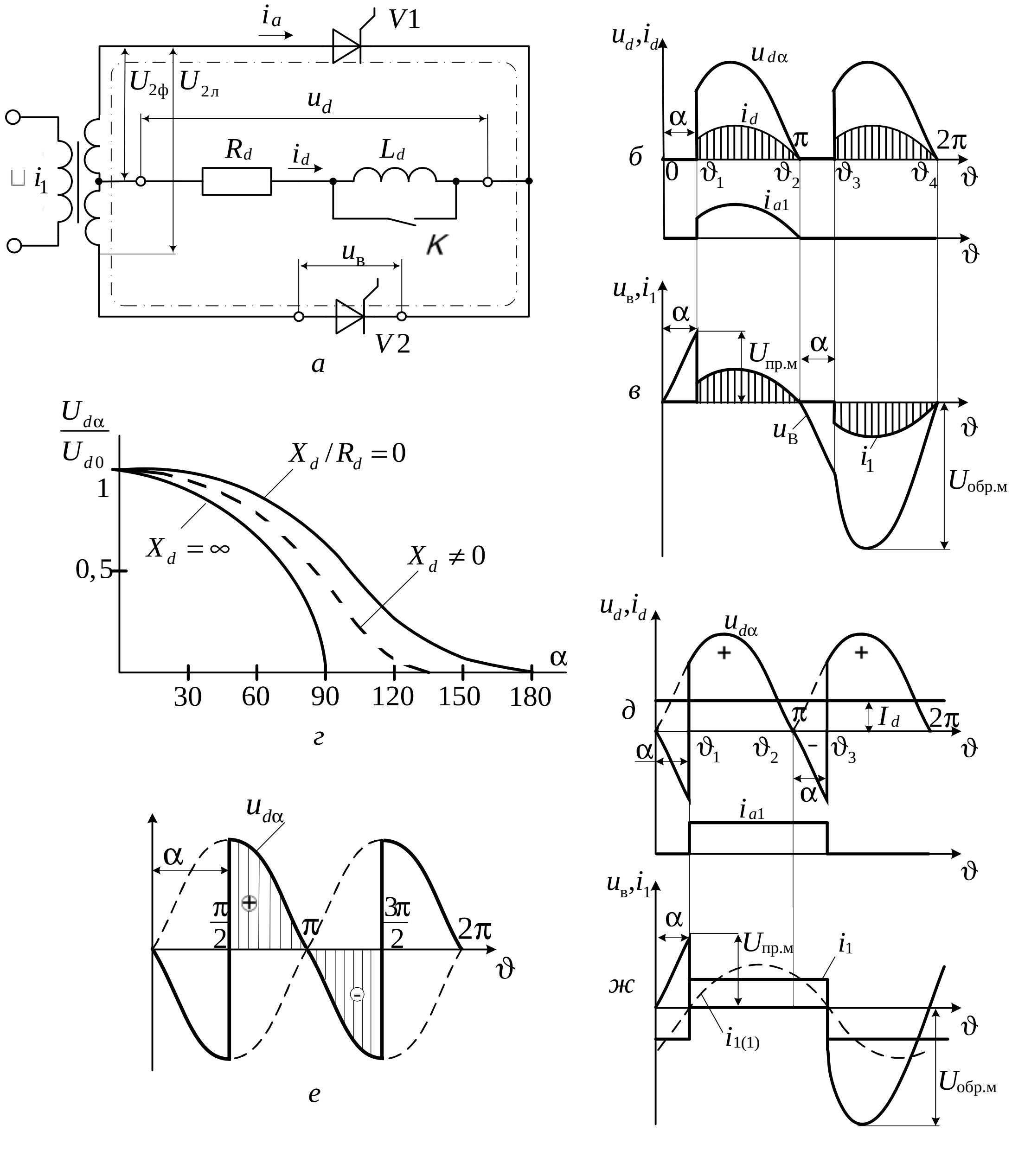

Рис. 2. Однофазный двухполупериодный выпрямитель с выводом нулевой точки (*а*), токи и напряжения при работе на активную нагрузку (*б*, *в*) и активно-индуктивную нагрузку (*г*, *д*)

В момент $\vartheta_2 = \pi$ (рис. 2, *б*) фазное напряжение сменит знак, ток вентиля упадет до нуля, и он выключится. Далее в интервале $\vartheta_2 - \vartheta_3$, равном углу управления α, оба вентиля будут в закрытом состоянии, и в момент ϑ_3 вступит в работу вентиль В2. В момент ϑ_4 вентиль В2 выключается, и через интервал, равный углу α, вновь вступит в работу вентиль В1.

В случае работы выпрямителя на чисто активную нагрузку кривая выпрямленного тока полностью повторяет форму кривой u_d.

На рис. 2, *б* представлен характер изменения величин u_d и i_d для случая работы схемы с углом управления $\alpha = 60°$. Кривая напряжения на вентиле $u_В$ приведена на рис. 2, *в*. В интервале $\vartheta_1 - \vartheta_2$ вентиль В1 находится в открытом состоянии, и падение напряжения на нем равно нулю. В момент прохождения тока i_a через нуль $\vartheta_2 = \pi$ вентиль В1 выключается, и на нем начинает расти уже отрицательное напряжение, равное фазному, поскольку вентиль В2 также находится в закрытом состоянии. В момент $\vartheta_3 = \pi + \alpha$ включится вентиль В2, и к вентилю В1 прикладывается линейное напряжение $U_{2л}$ вторичной обмотки трансформатора (см. контур, обведенный на рис. 2, *а* штрихпунктирной линией).

Линейное напряжение будет приложено к вентилю В1 вплоть до момента $\vartheta_4 = 2\pi$, когда выключится вентиль В2. В дальнейшем процессы в схеме начнут повторяться. Кривая напряжения на вентиле В2 аналогична кривой $u_В$ на вентиле В1, но только смещена по отношению к ней на половину периода питающего напряжения. На рис. 2, *в* изображена кривая напряжения $u_В$ на вентиле В1 и кривая тока первичной обмотки трансформатора i_1. Форма кривой тока i_1 определяется из условия компенсации магнитодвижущих сил (МДС) первичной и вторичной обмоток выпрямительного трансформатора.

Среднее значение выпрямительного напряжения можно вычислить следующим образом:

$$U_d = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi}\sqrt{2}U_{2ф}\sin\vartheta d\vartheta = \frac{\sqrt{2}}{\pi}U_{2ф}\left(1+\cos\alpha\right). \qquad (1)$$

Умножив числитель и знаменатель (1) на 2, представим формулу в следующем виде:

$$U_d = U_{d0}\frac{1+\cos\alpha}{2}, \qquad (2)$$

где $U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}U_{2ф} = 0,9U_{2ф}$ – значение U_d при $\alpha = 0$.

Для управляемых выпрямителей важной характеристикой является регулировочная характеристика $U_d = f(\alpha)$, представленная для данной схемы формулой (2). Как видно из (2), в случае работы выпрямителя на чисто активную нагрузку предельным углом управления α, при котором выпрямленное напряжение равняется нулю, будет угол $\alpha_{max} = 180°$ (рис. 2, *г*).

Максимальное обратное напряжение на вентиле $U_{\text{обр.м}}$ при углах $\alpha < 90°$ равно амплитуде линейного напряжения вторичной обмотки трансформатора

$$U_{\text{обр.м}} = 2\sqrt{2}U_{2\text{ф}}.$$

Максимальное прямое напряжение на вентиле в закрытом состоянии $U_{\text{пр.м}}$ при $\alpha < 90°$ зависит от угла управления следующим образом:

$$U_{\text{пр.м}} = \sqrt{2}U_{2\text{ф}} \sin\alpha. \qquad (3)$$

Как видно из (3), при $\alpha = 90°$ напряжение $U_{\text{пр.м}}$ достигает максимума. В этом случае $U_{\text{пр.м}}$ равно амплитуде фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора. Средний выпрямленный ток может быть представлен следующей формулой:

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{U_{d0}}{R_d}\left[\frac{1+\cos\alpha}{2}\right].$$

Среднее значение тока через вентиль равно

$$I_{\text{В.ср}} = I_d / 2. \qquad (4)$$

Действующий ток через вентиль ($I_{\text{В}} = I_2$) определяется следующим образом:

$$I_{\text{В}} = I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} i_{\text{В}}^2 d\vartheta} = I_{\text{В.ср}} k_f = \frac{I_d}{2} k_f, \qquad (5)$$

где k_f – коэффициент формы кривой тока в вентиле:

$$k_f = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{\frac{1}{\pi}\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{4}\sin 2\alpha\right)}}{1+\cos\alpha}. \qquad (6)$$

Как видно из формул (5) и (6), соотношение между средним и действующим токами вентиля зависит от угла управления α. С увеличением угла α отношение действующего тока к среднему возрастает. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете элементов схемы выпрямителя (вентили, трансформатор), особенно в случаях проектирования выпрямителей, предназначенных для работы в режимах стабилизации выпрямленного тока.

Действующий первичный ток трансформатора может быть определен следующим образом. Как видно из рис. 2, *б* и *в*, мгновенные токи i_1 и i_2 пропорциональны:

$$i_1 = i_{\text{В}} / k_{\text{т}}.$$

Следовательно, для I_1 с учетом (6) можно записать

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i_1^2 d\vartheta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\left(2\int_\alpha^\pi \frac{i_\text{В}^2}{k_\text{т}^2} d\vartheta\right)} = \frac{\sqrt{2}}{k_\text{т}}\sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_\alpha^\pi i_\text{В}^2 d\vartheta},$$

или окончательно

$$I_1 \frac{\sqrt{2}}{k_\text{т}} I_\text{В} = \frac{\sqrt{2}}{k_\text{т}} I_2, \qquad (7)$$

где $k_\text{т} = \frac{U_1}{U_2}$ – коэффициент трансформации силового трансформатора.

2.2. Работа управляемого выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку

Процессы в выпрямителе в случае его работы в режиме сглаженного выпрямленного тока (ключ К на рис. 2, *а* разомкнут) существенно отличаются от процессов при работе схемы на активную нагрузку. Полагаем индуктивность $L_d = \infty$.

Тогда в отличие от случая работы схемы на активную нагрузку вентиль В1, вступив в работу в момент времени $\vartheta_1 = \alpha$ (см. рис. 2, *д*), будет проводить ток нагрузки вплоть до момента $\vartheta_3 = \pi + \alpha$, когда произойдет коммутация и в работу вступит вентиль В2. В связи с этим выпрямленное напряжение u_d на некоторых интервалах 0 – α; $\pi - (\pi + \alpha)$ принимает отрицательное значение. Это объясняется тем, что в этих интервалах ток через нагрузку поддерживается запасом энергии, накопленной в индуктивности L_d. Среднее значение выпрямленного напряжения при этом может быть определено следующим образом:

$$U_d = \frac{1}{\pi}\int_\alpha^{\pi+\alpha} \sqrt{2} U_{2\text{Ф}} \sin\vartheta d\vartheta.$$

Произведя интегрирование и подставив значение U_{d0}, получим

$$U_d = U_{d0}\cos\alpha. \qquad (8)$$

Как видно из (8), регулировочная характеристика в этом режиме имеет иной вид, чем в случае работы на чисто активную нагрузку. Предельным углом управления (при котором $U_d = 0$) является угол α_{max} = 90° (см. рис. 2, *г*). Действительно, при α = 90°

площади положительной и отрицательной полярности (см. рис. 2, *е*) выпрямленного напряжения $U_{d\alpha}$ равны.

Кривая напряжения на вентиле В1 показана на рис. 2, *ж*. В интервале $\vartheta = 0 - \alpha$ ток проводит вентиль В2, а вентиль В1 находится в закрытом состоянии и к нему приложено линейное напряжение вторичной обмотки $U_{2л}$ трансформатора (см. контур, обведенный на рис. 2, *а* штрихпунктирной линией). Полярность приложенного к вентилю напряжения положительна. Далее, в интервале $\vartheta = \alpha - (\pi + \alpha)$ проводит вентиль В1 и напряжение на нем равно нулю. В момент $\vartheta_3 = \pi + \alpha$ включается вентиль В2, ток переходит на него, и вентиль В1 выключается. После выключения к вентилю В1 опять прикладывается линейное напряжение вторичной обмотки трансформатора, но уже с отрицательной полярностью. В момент времени $\vartheta = 2\pi$ напряжение на вентиле меняет знак, и процессы начинают повторяться. Максимальное обратное напряжение на вентиле, как это видно на рис. 2, *д*, равно амплитуде линейного напряжения вторичной обмотки

$$U_{\text{обр.max}} = \sqrt{2} U_{2л} = 2\sqrt{2} U_{2ф}.$$

Максимальное прямое напряжение на вентиле $U_{\text{пр.max}}$ зависит от угла α следующим образом:

$$U_{\text{пр.max}} = 2\sqrt{2} U_{2ф} \sin\alpha.$$

Средний выпрямленный ток может быть определен как

$$I_d = U_d / R_d.$$

Соотношения между токами в элементах схемы в случае $L_d = \infty$ не зависят от угла α и определяются формулами, выведенными для случая неуправляемого выпрямителя.

Форма кривой тока через вентиль представляет собой прямоугольные импульсы с амплитудой, равной I_d и длительностью 180°. Кривая первичного тока i_1, как и для случая неуправляемого выпрямителя, имеет прямоугольную форму (см. рис. 2, *ж*), и моменты перехода ее через нуль сдвинуты в сторону отставания относительно кривой питающего напряжения на угол $\varphi_1 = \alpha$.

При наличии управления первая гармоника тока $i_{1(1)}$ отстает по фазе от питающего напряжения на угол φ_1, равный углу управления α. Вследствие этого $\cos\varphi_1$ выпрямительных установок с управляемыми вентилями меньше единицы и тем ниже, чем с большими углами управления работает выпрямитель.

2.3. Работа управляемого выпрямителя с нулевым вентилем

Регулирование выпрямленного напряжения с помощью управляемых вентилей ухудшает коэффициент мощности выпрямителя. Это приводит к потреблению выпрямителем из сети реактивной мощности. Подобное явление можно несколько ослабить, используя в схеме выпрямителя так называемый нулевой вентиль. Схема управляемого выпрямителя с нулевым вентилем приведена на рис. 3, *а*.

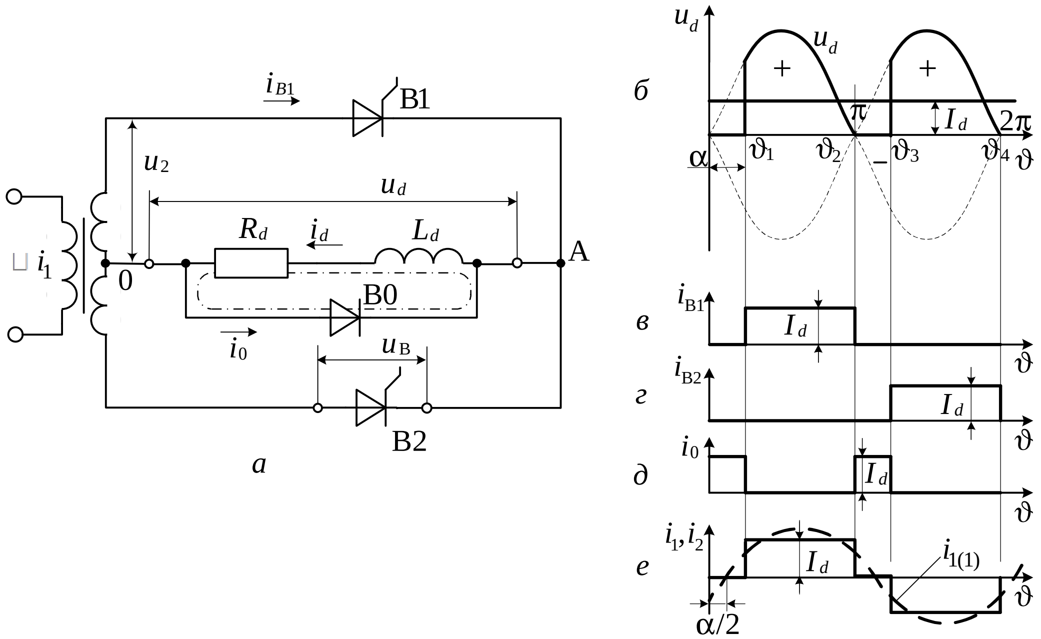

Рис. 3. Управляемый выпрямитель с нулевым вентилем (*а*), напряжения и токи в схеме (*б* – *е*)

Нулевым вентилем В0 здесь служит неуправляемый вентиль, включенный параллельно нагрузке и сглаживающей индуктивности L_d, с полярностью, показанной на рис. 3, *а*. Использование в схеме нулевого вентиля целесообразно только при работе выпрямителя с большими значениями L_d. Для упрощения положим, что выпрямленный ток i_d идеально сглажен. Начнем рассмотрение работы схемы с интервала $\vartheta_1 - \vartheta_2$ (рис. 3, *б*). В этом интервале работает вентиль В1.

В момент времени ϑ_2 (рис. 3, *б*) в случае отсутствия нулевого вентиля напряжение на последовательно соединенных сглаживающей индуктивности L_d и сопротивлении нагрузки меняет свою полярность. В результате точка A на рис. 3, *а* получает отрицательный потенциал по отношению к средней точке вторичной обмотки (0).

Введение в схему нулевого вентиля исключает явление смены полярности на выходе выпрямителя. Напряжение отрицательной полярности на выходе схемы не может возникнуть по той причине, что это приводит к включению вентиля В0, который сразу шунтирует выход схемы. Таким образом, в момент времени, следующий за ϑ_2, включается нулевой вентиль В0, который перехватывает ток нагрузки i_d. Ток нагрузки в этом случае протекает в контуре, обведенном на рис. 3, *а* штрихпунктирной линией. Вентиль В1 при этом выключается, так как полярность напряжения на нем становится отрицательной. Вентиль В0 будет проводить ток до момента ϑ_3 (рис. 3, *б*), когда включается вентиль В2. При этом напряжение на нагрузке u_d сразу же возрастет до положительного значения, определяемого углом управления α, и вентиль В0 выключается. В результате в интервале $\vartheta_2 - \vartheta_3$ мгновенное выпрямленное напряжение u_d будет равно нулю.

Вентиль В2 работает в интервале $\vartheta_3 - \vartheta_4$. В момент ϑ_4 вновь включается нулевой вентиль и подхватывает ток нагрузки, поддерживая его вплоть до момента включения вентиля В1. Далее процессы в схеме повторяются. Таким образом, нулевой вентиль вступает в работу дважды за период питающего напряжения на отрезках времени, соответствующих углам управления α.

На рис. 3, *в* - *е* показаны токи через основные вентили схемы, нулевой вентиль и ток первичной обмотки трансформатора. Как видно из рис. 3, *е*, первая гармоника первичного тока $i_{1(1)}$ (показана пунктиром) всегда смещена по отношению к синусоиде напряжения на угол α/2 (в случае работы схемы без нулевого вентиля первая гармоника первичного тока смещена по отношению к питающему напряжению на угол α). Из этого следует, что выпрямитель с нулевым вентилем может иметь $\cos\varphi_1$, более высокий, чем выпрямитель без нулевого вентиля.

Как видно из сравнения рис. 2, *б* и рис. 3, *б*, среднее выпрямленное напряжение схемы U_d зависит от угла управления α так же, как и в случае работы схемы на чисто активную нагрузку.

Максимальное обратное напряжение на вентиле по-прежнему равно амплитуде линейного напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Средний ток через рабочий вентиль

$$I_{\text{В.ср}} = \frac{I_d}{2}\frac{\pi-\alpha}{\pi}.$$

Действующий ток через рабочий вентиль равен действующему значению тока вторичной обмотки трансформатора

$$I_{\text{В}} = I_2 = \frac{I_d}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{\pi}}. \qquad (9)$$

Действующий первичный ток

$$I_1 = \frac{I_d}{k_{\text{т}}}\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{\pi}}. \qquad (10)$$

Средний и действующий токи через нулевой вентиль равны

$$I_{0\text{ср}} = I_d\alpha/\pi,$$

$$I_0 = I_d\sqrt{\alpha/\pi}.$$

2.4. Однофазная мостовая схема

Схема однофазного мостового выпрямителя изображена на рис. 4, *а*. Вначале рассмотрим вариант режима работы схемы на чисто активную нагрузку при $\alpha = 0$ (угол α здесь отсчитывается от нуля синусоиды напряжения вторичной обмотки трансформатора). Работа выпрямителя с $\alpha = 0$ эквивалентна случаю использования в схеме неуправляемых вентилей.

Предположим, что в первом полупериоде начало вторичной обмотки питающего трансформатора (помечено точкой) положительно по отношению к концу обмотки (интервал $0 - \vartheta_1$ на рис. 4, б).

В этом случае при подаче на управляющий электрод вентилей В1 и В3 управляющих импульсов они включаются, и контур протекания тока, отмеченный на рис. 4, *а* пунктирной линией, пройдет через вторичную обмотку трансформатора, вентили В1 и В3 и сопротивление нагрузки R_d. В результате в интервале $0-\vartheta_1$ к нагрузке будет приложено напряжение вторичной обмотки u_2. Вентили В2 и В4 на этом интервале находятся в закрытом состоянии, так как к ним прикладывается напряжение вторичной обмотки трансформатора, являющееся для них отрицательным. При смене полярности напряжения на вторичной обмотке трансформатора включается вторая пара вентилей (В2 и В4), а вентили В1 и В3 выключаются (интервал ϑ_2 на рис. 4, *б*). Таким образом, вентили схемы работают попарно, пропуская через сопротивление нагрузки обе полуволны переменного тока. Кривая выпрямленного напряжения u_d изображена на рис. 4, *б*. Выпрямленное напряжение представляет собой однополярные полуволны питающего переменного напряжения. Кратность пульсаций в кривой выпрямленного напряжения по отношению к частоте сети равна двум.

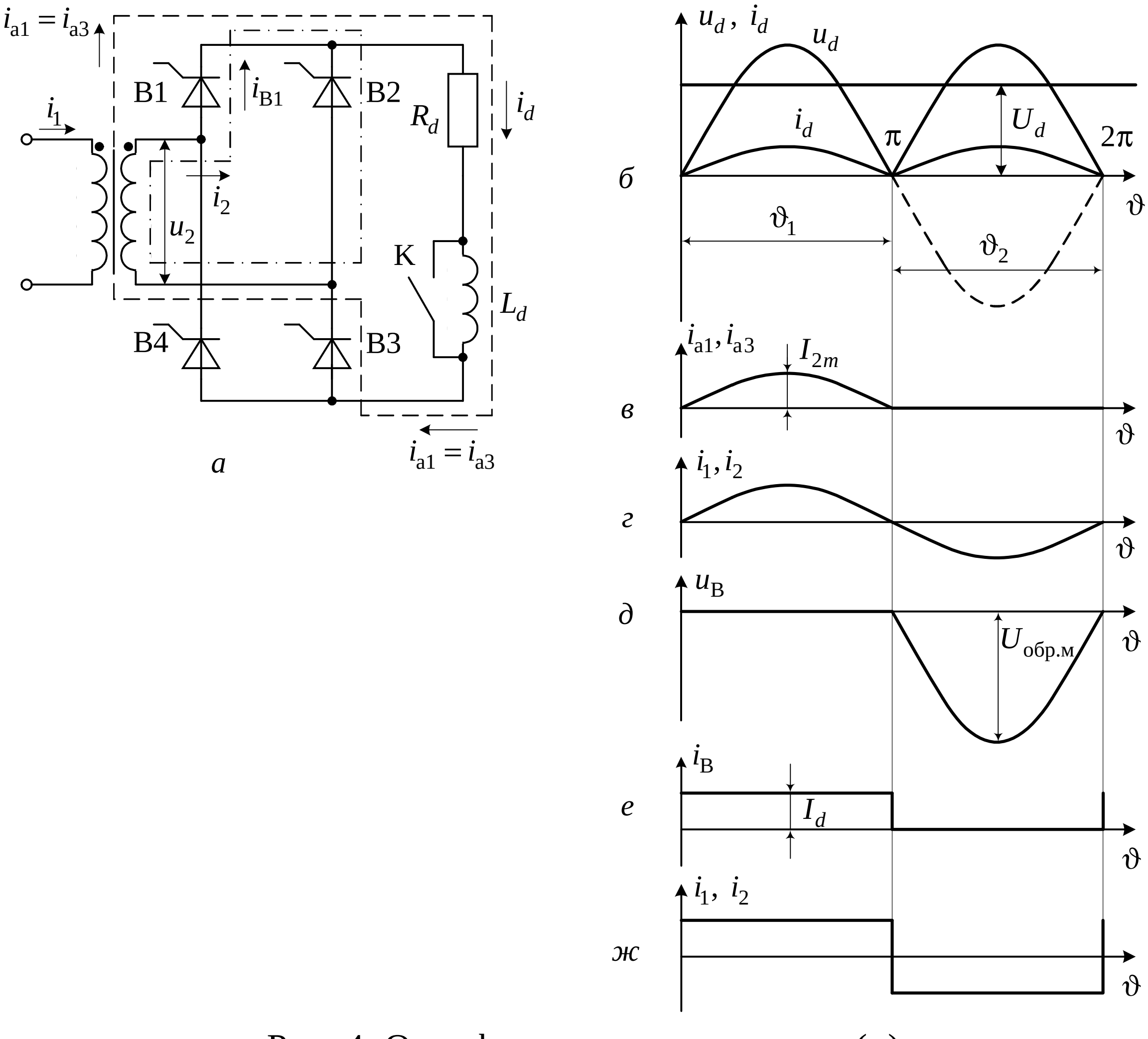

Рис. 4. Однофазная мостовая схема (*а*),
токи и напряжения при работе на активную нагрузку и α = 0 (*б* – *ж*)

Форма выпрямленного тока i_d (см. рис. 4, *б*) полностью повторяет кривую выпрямленного напряжения. На рис. 4, *в*, *г* показаны кривые токов через вентиль и вторичной обмотки трансформатора (i_B и i_2).

В определенном масштабе кривая тока i_2 является и кривой тока первичной обмотки трансформатора i_1. На рис. 4, *д* изображена кривая напряжения на вентиле $u_\text{В}$.

Среднее выпрямленное напряжение и максимальное обратное напряжение на вентиле определяются следующим образом:

$$U_d = \frac{1}{T}\int_0^{\pi} u_d dt = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{2\text{ф}} = 0,9U_{2\text{ф}},$$

$$U_{\text{обр.м}} = \sqrt{2}U_{2\text{ф}} = 1,41U_{2\text{ф}}.$$

Средний и действующий токи через вентиль соответственно равны

$$I_{\text{В.ср}} = I_d / 2, \; I_\text{В} = \frac{\pi}{4} I_d.$$

Действующие токи вторичной и первичной обмоток трансформатора могут быть найдены следующим образом:

$$I_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_d, \; I_1 = \frac{1}{k_\text{т}} \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_d.$$

Полные мощности обмоток трансформатора в мостовом выпрямителе равны между собой и равны типовой мощности трансформатора. Выражая их через

$$P'_{d\text{н}} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} u_d i_d d\vartheta = U_{2\text{ф}} I_{2\text{н}},$$

получаем

$$S_\text{т} = S_1 = S_2 = U_{2\text{ф}} I_{2\text{н}} = P'_{d\text{н}}.$$

Коэффициент повышения расчетной мощности трансформатора и коэффициенты использования вентилей по напряжению и току соответственно равны

$$k_\text{п} = 1; \; k_U = \pi / 2; \; k_i = \pi / 4; \; k_{i\text{ср}} = 1/2.$$

Рассмотрим работу выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку при $\alpha = 0$. Полагаем ток нагрузки идеально сглаженным $(L_d = \infty)$. В этом случае изменяются только токи в элементах схемы и форма их кривой. На процессе коммутации групп вентилей это явление не сказывается, так как при смене полярности напряжения на вторичной обмотке идеального трансформатора ток может мгновенно менять свое направление. Следовательно, переход тока с вентиля на вентиль будет происходить, как и в случае работы схемы на чисто активное сопротивление, в моменты прохождения через нуль напряжения на вторичной обмотке. Ток вентиля имеет вид прямоугольных импульсов с амплитудой, равной выпрямленному току L_d, длительностью 180° (см. рис. 4, *е*).

Средний и действующий токи равны

$$I_{\text{В.ср}} = I_d \; / \; 2\,; \; I_{\text{В}} = I_d \; / \; \sqrt{2}\,.$$

Форма кривой тока первичной и вторичной обмоток трансформатора будет прямоугольной (см. рис. 4, *ж*). Действующие токи в обмотках трансформатора определяются следующим образом:

$$I_2 = I_d\,; \; I_1 = I_d \; / \; k_{\text{т}}\,.$$

Для полных мощностей обмоток трансформатора и его типовой мощности может быть найдено

$$S_{\text{ò}} = S_1 = S_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} P_{d\text{í}} = 1{,}11 P_{d\text{í}}\;.$$

Коэффициент повышения расчетной мощности трансформатора и коэффициенты использования вентилей по напряжению и току для однофазной мостовой схемы при $L_d = \infty$ соответственно равны

$$k_{\text{п}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}};\;\; k_U = \frac{\pi}{2};\;\; k_1 = \frac{1}{\sqrt{2}};\;\; k_{I_{\text{ср}}} = \frac{1}{2}.$$

Рассмотрим работу схемы на активную нагрузку при $\alpha \neq 0$. Пусть, например, в момент времени ϑ_1 (рис. 5, *а*) на вентили В1 и В3 поданы управляющие импульсы. Вентили включаются, и в интервале $\vartheta_1 - \vartheta_2$ ток протекает через сопротивление нагрузки R_d. В момент ϑ_2 ток проходит через нуль, и вентили В1 и В3 выключаются. В интервале $\vartheta_2 - \vartheta_3$ все вентили находятся в закрытом состоянии. Далее в момент ϑ_3 подаются управляющие импульсы на следующую пару вентилей (В2 и В4). Вентили В2 и В4 работают аналогично вентилям В1 и В3, но только с 180-градусным смещением по фазе (интервал $\vartheta_3 - \vartheta_4$).

Кривые выпрямленного напряжения и тока (u_d и i_d) однофазной мостовой схемы для α = 60° приведены на рис. 5, *а*. Они аналогичны соответствующим кривым для однофазной схемы со средней точкой. Естественно, что будут аналогичны и количественные соотношения. В частности, регулировочная характеристика выпрямителя будет определяться формулой (2).

На рис. 5, *б* приведена кривая напряжения на вентиле $u_{\text{В}}$ для схемы с четырьмя управляемыми вентилями. В данном случае для определения напряжения на вентиле необходимо несколько отступить от принятой системы идеализации элементов схемы.

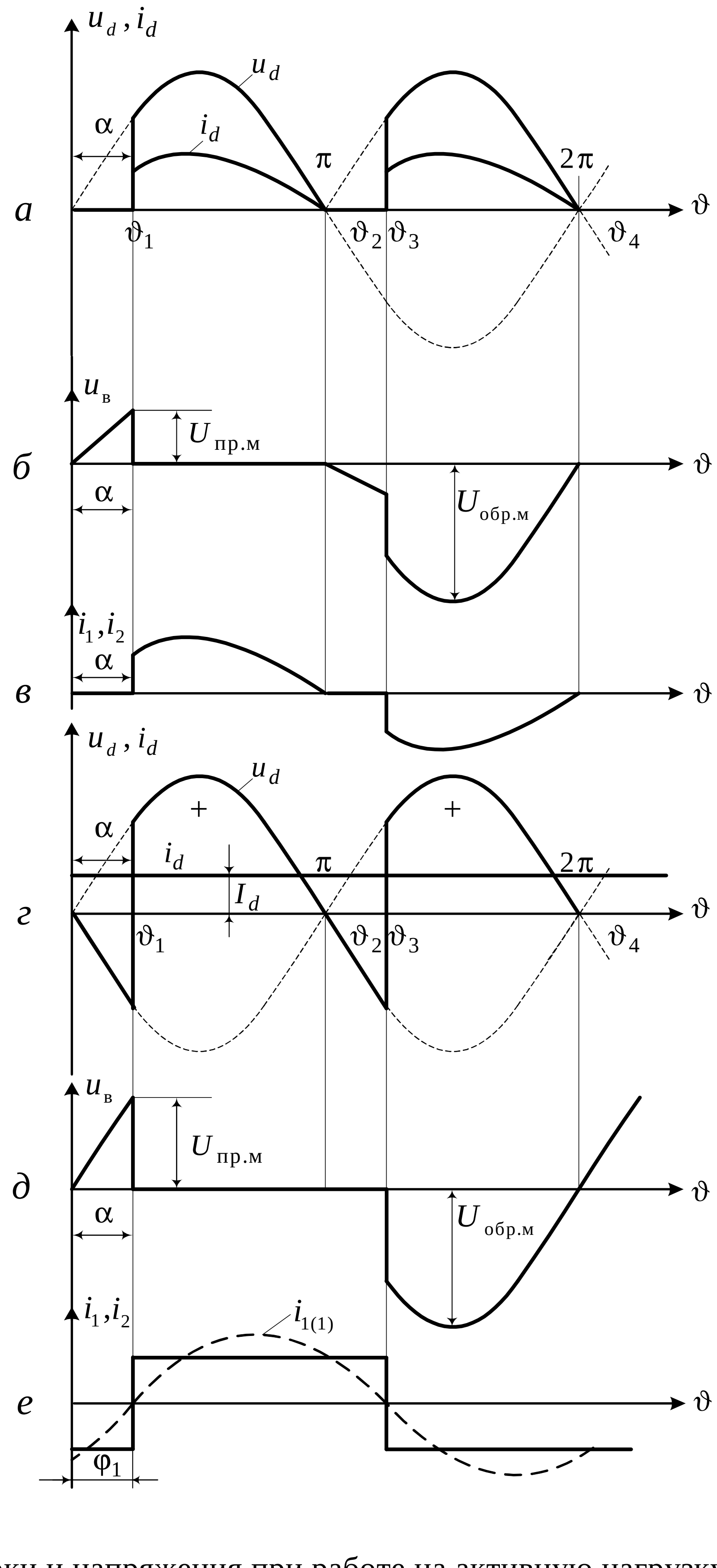

Рис. 5. Токи и напряжения при работе на активную нагрузку (*а – в*) и активно-индуктивную нагрузку (*г – е*)

Следует принять, что вентили обладают в закрытом состоянии в прямом и обратном направлениях большим, но вполне конечным сопротивлением $R_В$ (причем $R_В >> R_d$). Рассмотрев схему на рис. 4, *а*, можно заключить, что в интервале $0-\vartheta_1$, когда все вентили находятся в закрытом состоянии, напряжение на вентиле В1 равно половине напряжения вторичной обмотки трансформатора и по отношению к аноду вентиля В1 положительно (контур, обведенный штрихпунктирной линией); в интервале $\vartheta_1-\vartheta_2$ напряжение на вентиле В1 равно нулю, так как вентиль включен и проводит ток.

Далее на отрезке времени $\vartheta_2-\vartheta_3$ все вентили находятся в закрытом состоянии и образуют мостовую схему из четырех равных сопротивлений $R_В$. Поскольку полярность напряжения u_2 сменилась, то в этом же случае к вентилю В1 приложена половина напряжения вторичной обмотки u_2 в обратном направлении.

Наконец, в момент ϑ_3 включаются вентили В2 и В4 и к вентилю В1 прикладывается полное напряжение вторичной обмотки трансформатора с отрицательной полярностью (интервал $\vartheta_3-\vartheta_4$). Такое же по форме напряжение будет на вентиле В3. Максимальное обратное напряжение на вентилях, как и для случая работы схемы с неуправляемыми вентилями, равно амплитуде напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Максимальное прямое напряжение на вентиле зависит от угла управления следующим образом:

$$U_{\text{пр.м}} = \sqrt{2}U_{2\text{ф}} \sin\alpha .$$

Как видно из рис. 2 и 5, форма кривых тока через вентиль одинакова как для однофазной мостовой, так и однофазной схемы со средней точкой. Следовательно, будут одинаковыми и соотношения для средних и действующих значений. Форма кривых токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора мостовой схемы одинакова (см. рис. 5, *в*). Действующий первичный ток $I_1 = I_2 / k_т$ может быть определен с помощью (5) и (7):

$$I_1 \frac{\sqrt{2}}{k_\text{т}} I_\text{В} .$$

Рассмотрим работу схемы на активно-индуктивную нагрузку при $\alpha \neq 0$. Полагаем, что в схеме на рис. 4, *а* ключ К разомкнут и $L_d = \infty$.

Пусть в момент ϑ_1 (см. рис. 5, *г*) подаются управляющие сигналы на вентили В1 и В3, и они включаются. Как видно из рис. 5, *г*, где изображены кривые выпрямленного тока i_d, ток через вентили В1 и В3 не обрывается в момент прохождения фазного напряжения через нуль (момент ϑ_2), как это бывает в случае чисто активной нагрузки, а продолжает течь вплоть до момента коммутации на следующую пару вентилей (момент ϑ_3). Кривая выпрямленного напряжения на выходе выпрямителя (см. рис. 5, *г*) аналогична кривой выпрямленного напряжения однофазной двухполупериодной схемы со средней точкой. Регулировочная характеристика выпрямителя в этом случае будет определяться формулой (8).

Кривая напряжения $u_В$ на вентиле В1 приведена на рис. 5, *д*. На интервале $0-\vartheta_1$ проводят ток вентили В2 и В4. Как видно из рис. 4, *а*, к вентилям В1 и В3 на этом участке приложено напряжение вторичной обмотки с положительной полярностью. Далее в интервале $\vartheta_1-\vartheta_3$ вентиль В1 проводит ток, и напряжение на нем равно нулю. В момент ϑ_3 происходит коммутация тока I_d на вентили В2 и В4, а на вентилях В1 и В3 снова оказывается напряжение вторичной обмотки трансформатора, но только в этом случае уже с отрицательной полярностью.

Максимальное обратное напряжение на вентиле равно амплитуде напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Максимальное прямое напряжение на вентиле зависит от угла управления следующим образом:

$$U_{\text{пр.м}} = \sqrt{2} U_{2\text{ф}} \sin\alpha .$$

Кривые первичного и вторичного токов (i_1 и i_2) представлены на рис. 5, *е*. Ток i_1 по своей форме одинаков с кривой тока однофазной двухполупериодной схемы со средней точкой. Действующие токи I_1 и I_2 соответственно равны

$$I_1 = I_d / k_т; \;\; I_2 = I_d.$$

2.5. Однофазная схема с неполным числом управляемых вентилей при работе на активно-индуктивную нагрузку

В мостовых схемах имеется возможность применять управляемые вентили в половинном числе от полного числа используемых вентилей (полууправляемые или несимметричные схемы). Это дает выигрыш с точки зрения стоимости комплекта вентилей и упрощения системы управления выпрямителя. На рис. 6, *а*, *б* представлены два возможных варианта соединения управляемых вентилей.

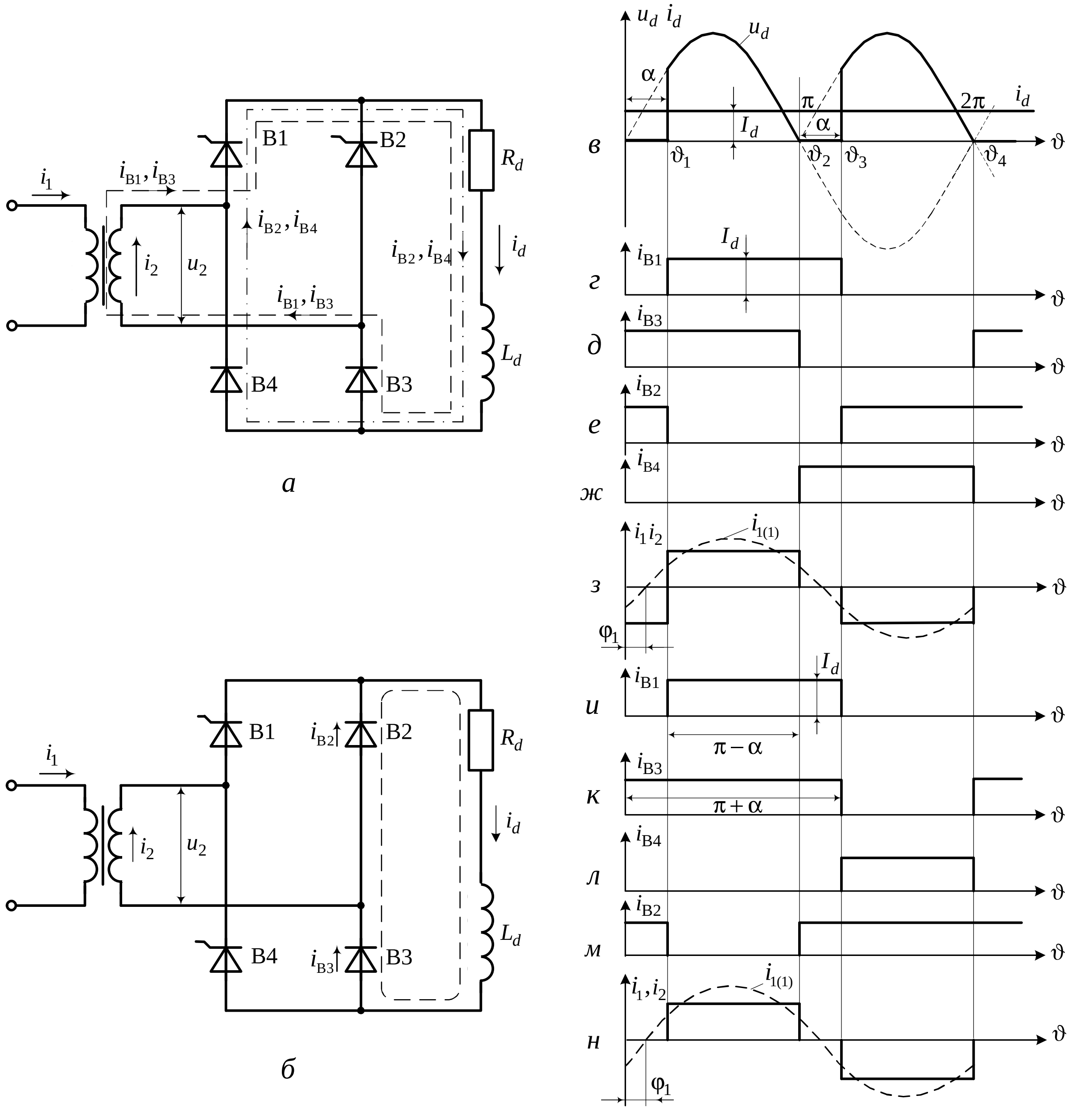

Рис. 6. Однофазная мостовая схема с неполным числом управляемых вентилей. Токи и напряжения на элементах схемы

В связи с тем, что в однофазной мостовой схеме вентили проводят ток попарно, очевидно, что в обоих полупериодах будет работать пара вентилей, обязательно содержащая один управляемый вентиль. Согласно обозначениям рис. 6, *а* в схеме работают попеременно пары вентилей В1, В3 и В2, В4. Пусть в интервале $\vartheta_1 - \vartheta_2$ (рис. 6, *в*) в схеме, показанной на рис. 6, *а*, проводят вентили В1 и В3 (направление протекания тока показано пунктиром).

В момент ϑ_2 напряжение на вторичной обмотке трансформатора меняет знак. В результате этого происходит коммутация тока в анодной группе неуправляемых вентилей и ток i_d переходит с вентиля В3 на В4. В катодной группе коммутация в данный момент не может произойти, так как управляемый вентиль В2 выключен. В группе управляемых вентилей коммутация осуществляется в момент подачи управляющего импульса на очередной вентиль В2.

Таким образом, получается, что от момента прохождения через нуль синусоидального напряжения до момента включения очередного управляемого вентиля, т.е. в интервалах $0 - \alpha$ и $\pi - (\pi + \alpha)$, ток нагрузки i_d проводят два последовательно соединенных вентиля: В1 и В4 на интервале $0 - \alpha$ (контур тока показан на рис. 6, *а* штрих-пунктиром) и В2, В3 на интервале $\vartheta_2 - \vartheta_3$. Выпрямленное напряжение в течение этих интервалов равно нулю (выход выпрямителя закорочен), и ток в нагрузке поддерживается за счет энергии, запасенной в индуктивности L_d.

На рис. 6, *г–з* построены токи вентилей и ток обмоток питающего трансформатора. Токи управляемых и неуправляемых вентилей по форме не отличаются от случая работы выпрямителя с полным числом управляемых вентилей, но сдвинуты по фазе друг относительно друга на угол α. Вследствие этого в кривой первичного тока имеются интервалы $i_1 = 0$, как в двухполупериодной схеме со средней точкой с нулевым вентилем (см. рис. 3, *а*). Кривая выпрямленного напряжения u_d имеет такой же вид, как в случае работы схемы на чисто активную нагрузку.

Процессы в схеме рис. 6, *б* протекают несколько иначе. Начнем с рассмотрения интервала $\vartheta_1 - \vartheta_2$ (см. рис. 6, *в*), в котором работают вентили В1 и В3 и напряжение $u_d = u_2$. В момент ϑ_2, когда напряжение на вторичной обмотке трансформатора сменит знак, произойдет коммутация тока с вентиля В1 на неуправляемый вентиль В2.

Коммутация в анодной группе задерживается, так как управляемый вентиль В4, который должен принять нагрузку, находится в закрытом состоянии. Поэтому до момента отпирания этого вентиля ток нагрузки i_d замкнется через два неуправляемых вентиля В2, В3 (контур тока показан на рис. 6, *б* пунктиром), и нагрузка окажется как бы отключенной от источника питания (u_d становится равным нулю). Вентиль В4 включится в момент $\vartheta_3 = \pi + \alpha$, произойдет коммутация тока с вентиля В3 на В4, и снова на нагрузке появится напряжение $u_d = u_2$.

Вентиль В4 будет проводить ток до момента появления положительного напряжения на неуправляемом вентиле В3, находящемся с ним в одной группе ($\vartheta_4 = 2\pi$). После коммутации тока с В4 на В3 (при работе вентиля В2) в выпрямленном напряжении появится пауза длительностью $\Delta\vartheta = \alpha$. Таким образом, кривая выпрямленного напряжения в схеме (см. рис. 6, *б*) будет иметь такой же вид, как в случае работы управляемого выпрямителя на активную нагрузку. Неуправляемые вентили проводят ток от моментов появления на них положительного напряжения ($\vartheta = 0, \pi$) до включения управляемых вентилей, находящихся в одной с ними группе ($\pi + \alpha; 2\pi + \alpha$), т.е. в течение $\lambda = \pi + \alpha$. Длительность прохождения тока через управляемые вентили меньше и равна $\lambda = \pi - \alpha$. На рис. 6, *и–н* показаны токи через вентили и обмотки трансформатора.

Средний и действующий токи через управляемые вентили в этой схеме будут соответственно равны

$$I_{\text{В.ср}} = \frac{I_d}{2}\frac{\pi - \alpha}{\pi}; \ I_{\text{В}} = \frac{I_d}{\sqrt{2}}\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}}.$$

Для неуправляемых вентилей

$$I_{\text{В.ср}} = \frac{I_d}{2}\frac{\pi + \alpha}{\pi}; \ I_{\text{В}} = \frac{I_d}{\sqrt{2}}\sqrt{1 + \frac{\alpha}{\pi}}.$$

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора

$$I_2 = I_d\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}}.$$

Действующее значение первичного тока трансформатора

$$I_1 = \frac{I_d}{k_{\text{т}}}\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}}.$$

По своим энергетическим характеристикам схемы, приведенные на рис. 6, *а*, *б*, равноценны. Кривые выходного напряжения и потребляемого тока для обеих рассматриваемых схем такие же, как и в однофазной двухполупериодной схеме с нулевым вентилем. Регулировочная характеристика схем рис. 6, *а*, *б* определяется формулой (2).

Как видно из рис. 6, *н*, первая гармоника первичного тока сдвинута по отношению к синусоиде питающего напряжения на угол $\alpha / 2$, т.е. $\cos\varphi_1 = \cos\frac{\alpha}{2}$. В результате $\cos\varphi_1$ в данной схеме выше, чем у схемы с полным числом управляемых вентилей.

2.6. Процессы коммутации в управляемом выпрямителе с реальным трансформатором

Коммутация в выпрямителе с нулевым выводом

В выпрямителях на идеальных элементах, рассмотренных в предыдущей главе, процесс коммутации тока, т.е. переход тока из фазы трансформатора с вентилем, заканчивающим работу, в фазу трансформатора с вентилем, вступающим в работу, осуществлялся мгновенно, что сопровождалось скачком тока. В реальных цепях всегда имеется индуктивность (внесенная или собственная), в которой невозможны скачки тока, а значит, невозможна и мгновенная коммутация. Очевидно, что реальный трансформатор будет заметно влиять на коммутацию своими реактивными сопротивлениями. Известная Т-образная схема замещения трансформатора представлена на рис. 7, *а*.

В отличие от энергетиков, которые приводят параметры трансформатора к первичной, т.е. сетевой, обмотке, в преобразовательной технике необходимо приведение параметров схемы замещения ко вторичной обмотке. Это связано с тем, что сначала строятся токи во вторичных обмотках трансформатора, и только затем – в первичных.

Прямое использование полной Т-образной схемы замещения трансформатора с тремя индуктивностями в расчетной модели выпрямителя настолько усложнит анализ (в п. 2.2 сделан учет всего одной индуктивности), что в аналитическом виде расчет станет практически невозможным. Поэтому необходимо разумное, в соответствии с целями анализа, упрощение схемы замещения. Профессиональное искусство специалиста состоит прежде всего в способности находить допустимые упрощения математической модели задачи, сам же расчет после этого носит в основном технический характер и с привлечением средств вычислительной техники становится доступным всем. А вот упрощение основано на четком понимании физики процессов, разделении их на значимые и малозначимые для целей анализа.

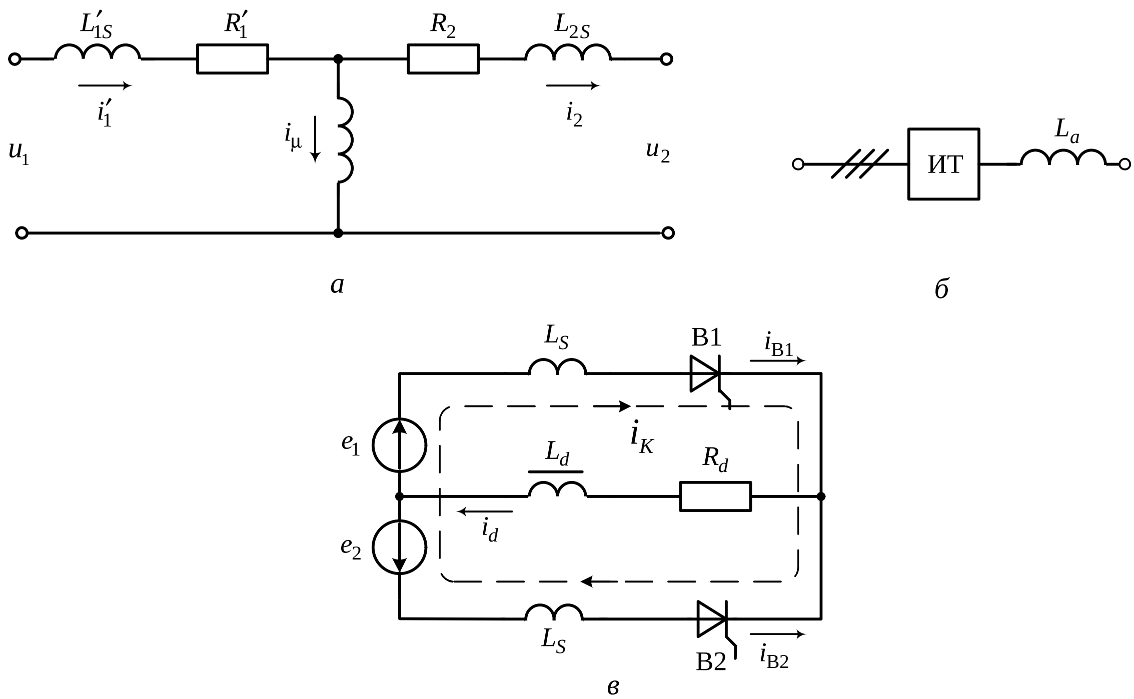

Рис. 7. Схемы замещения реального (*а*) и идеального (б) трансформаторов и управляемого выпрямителя (*в*)

Процесс коммутации тока в трансформаторе выпрямителя сопровождается отключением и подключением вторичных обмоток трансформатора к нагрузке, первичные обмотки трансформатора все время остаются подключенными к питающей сети. Следовательно, изменение основного магнитного потока в трансформаторе при коммутации практически не происходит, да и величина намагничивающего тока мощного трансформатора I_μ составляет несколько процентов от тока, обусловленного нагрузкой. Поэтому индуктивность намагничивания L_μ из схемы замещения можно на этом этапе исключить. В результате первого шага упрощения приходим к схеме замещения с одной индуктивностью

L_a, равной сумме индуктивностей рассеивания приведенной первичной и вторичной обмоток трансформатора, и одним активным сопротивлением R, также равным сумме активных сопротивлений приведенных первичной и вторичной обмоток. Индуктивность рассеивания трансформатора, приведенную ко вторичной (анодной) обмотке трансформатора выпрямителя, называют анодной индуктивностью.

Необходимость второго шага в упрощении расчетной схемы замещения трансформатора связана с тем обстоятельством, что расчетные соотношения в LR-цепи с вентилем имеют трансцендентный характер и это не позволяет получить конечные аналитические соотношения. Поэтому, зная из опыта, что реактивное сопротивление рассеивания трансформаторов средней и большой мощности в 3-5 раз больше активного сопротивления обмоток, последним можно пренебречь. Поскольку влияние L_a на выпрямленное напряжение через коммутацию на уровне нескольких процентов, влияние R_a будет на уровне одного процента, и сделанное второе упрощение также обоснованно.

Таким образом, оценку влияния реального трансформатора (РТ) на процесс коммутации токов в выпрямителе выполним заменой реального трансформатора на совокупность идеального трансформатора (ИТ) (как в предыдущих моделях) и суммарной индуктивности рассеивания обмоток, приведенной ко вторичной стороне L_a, как показано на рис. 7, *б*.

На рис. 7, *в* показана эквивалентная схема выпрямителя, соответствующая интервалу коммутации. Приведенные индуктивности питающей сети и рассеяния первичной обмотки трансформатора перенесены на вторичную сторону и объединены с индуктивностью рассеяния вторичной обмотки в виде двух эквивалентных индуктивностей L_S, отнесенных к каждой фазе. Значение $2L_S$ определяется по опыту короткого замыкания при закорачивании обеих последовательно соединенных вторичных обмоток. Электродвижущая сила вторичной обмотки представлена в виде двух источников e_1 и e_2.

Начнем рассмотрение процесса коммутации сразу с управляемого выпрямителя. Пусть в интервале $0-\vartheta_1$ (рис. 8, *а*) проводит вентиль В2. В момент ϑ_1 на вентиль В1 подается управляющий импульс, вентиль В1 включается, и начинается коммутация тока с вентиля В2 на вентиль В1. Контур коммутации на рис. 7, *в* обведен пунктирной линией.

В течение всего отрезка времени, пока ток переходит с вентиля на вентиль, оба вентиля будут открыты. Изменение анодных токов в процессе коммутации можно определить методом наложения. Результирующий ток вентиля в этом случае представляется как сумма двух токов, из которых первый – это ток, существовавший до начала процесса коммутации, а второй ($i_к$) – ток переходного процесса, возникающего в цепи при включении в работу очередного вентиля (В1):

$$\begin{aligned} i_{В1} &= 0 + i_к; \\ i_{В2} &= I_d - i_к. \end{aligned} \tag{11}$$

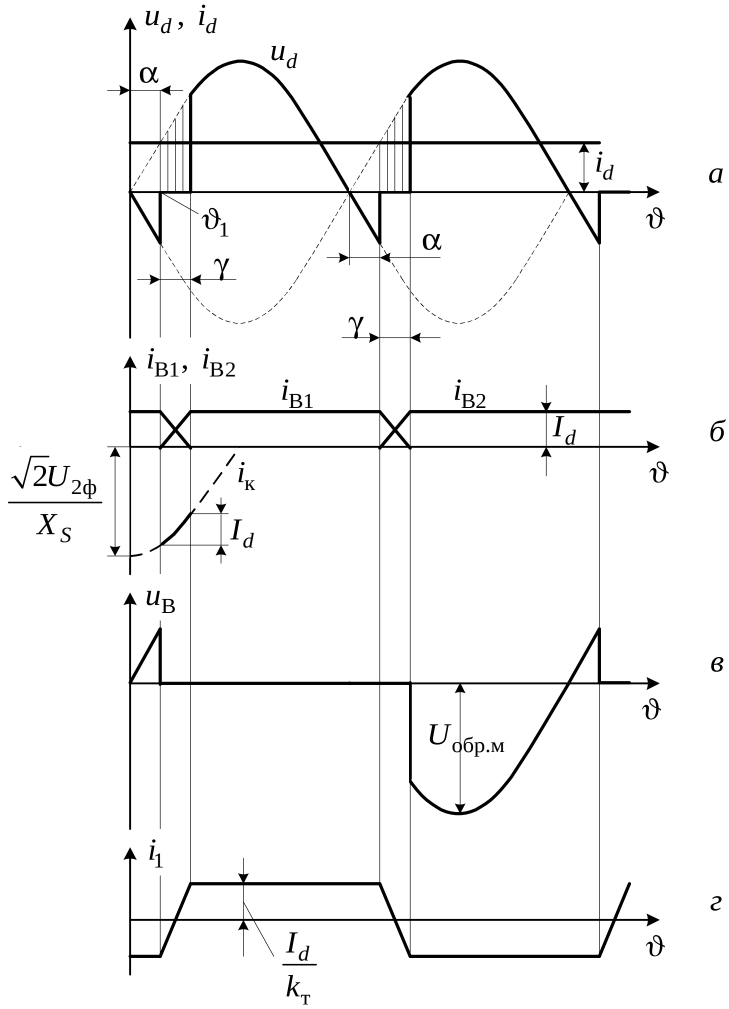

Рис. 8. Временные диаграммы управляемого выпрямителя с учетом процессов коммутации

Ток $i_к$ является собственно током короткого замыкания вторичной обмотки трансформатора (оба вентиля находятся в открытом состоянии). Иногда ток $i_к$ называют коммутирующим током. Полярность коммутирующего тока показана на рис. 7, *в* стрелкой. С ростом коммутирующего тока ток $i_{В2}$ в вентиле В2 будет спадать, а ток $i_{В1}$ в вентиле В1 соответственно нарастать. Процесс будет продолжаться до того момента, когда сравняются $i_{В2}$ и $i_к$, при этом результирующий ток вентиля В2 упадет до нуля, и вентиль В2 перейдет в закрытое состояние. Коммутирующий ток $i_к$ определяется индуктивностью контура коммутации и ЭДС, действующей в этом контуре. Эта ЭДС обычно называется коммутирующей ЭДС ($e_к$). Полагая момент $\vartheta_1 = \alpha$ за начало отсчета времени, можно записать

$$e_к = e_1 - e_2 = 2\sqrt{2}U_{2ф}\sin(\vartheta + \alpha).$$

Ток $i_к$ является переходным током, возникающим при включении индуктивной цепи на синусоидальное напряжение $e_к$ с фазой α. В результате выражение для $i_к$ может быть записано в виде

$$i_к = \frac{\sqrt{2}U_{2ф}}{X_S}\left[\cos\alpha - \cos(\alpha + \vartheta)\right], \quad (12)$$

где $X_S = \omega L_S$.

Так как ток вентиля, вступающего в работу, равен коммутирующему току, то $i_{В1} = i_к$. Изменение тока $i_{В2}$ в процессе коммутации нетрудно получить, подставив выражение $i_к$ из (12) в (11):

$$i_{В2} = I_d - i_к = I_d - \frac{\sqrt{2}U_{2ф}}{X_S}\left[\cos\alpha - \cos(\alpha + \vartheta)\right]. \quad (13)$$

Из формул (12) и (13) очевидно, что токи в вентилях в процессе коммутации меняются по косинусоидальному закону. При наличии процесса коммутации длительность прохождения тока через вентиль по сравнению с идеализированной схемой увеличится, и будет составлять уже не π, а π + γ (см. рис. 8, *б*). Угол коммутации γ может быть получен из граничных условий: в момент окончания коммутации ток $i_{В2}$ становится равным нулю, а ток $i_{В1} = i_к$ будет равен выпрямленному току I_d. Подставив в уравнение (12) $i_{В1} = i_к = I_d$ и $\vartheta = \gamma$, получим

$$I_d = \frac{\sqrt{2}U_{2ф}}{X_S}\left[\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma)\right]. \quad (14)$$

Уравнение (14) связывает угол γ со средним выпрямленным током и углом управления α. Обычно это уравнение записывается в виде

$$\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{I_d X_S}{\sqrt{2} U_{2ф}}, \qquad (15)$$

и называется уравнением коммутации.

Полагая угол коммутации при $\alpha = 0$ за некий параметр γ_0, из (15) можно получить

$$1 - \cos\gamma_0 = \frac{I_d X_S}{\sqrt{2} U_{2ф}}, \qquad (16)$$

разделив (15) и (16), получим

$$\frac{\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma)}{1 - \cos\gamma_0} = 1; \qquad (17)$$

окончательно из (17) можно получить выражение для γ:

$$\gamma = \arccos(\cos\alpha + \cos\gamma_0 - 1) - \alpha. \qquad (18)$$

Графики, построенные по формуле (18), приведены на рис. 9.

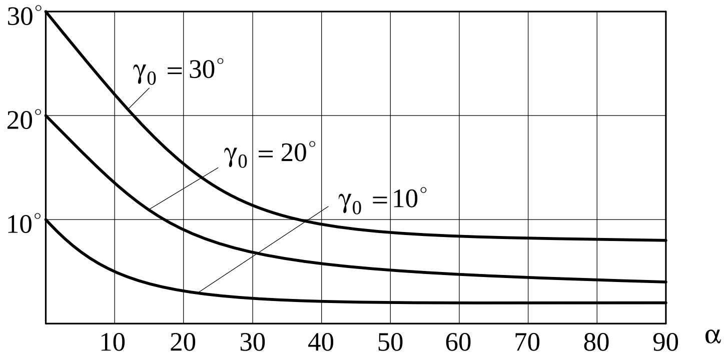

Рис. 9. Зависимость угла коммутации от угла управления

Из графиков виден характер изменения угла коммутации выпрямителя в зависимости от глубины управления выпрямленного напряжения, определяемой углом α.

В связи с тем, что в интервалах коммутации вторичная обмотка трансформатора замыкается накоротко, мгновенные выпрямленные напряжения в течение этих интервалов равны нулю. В результате, как видно из рис. 8, *а*, где показана кривая u_d, среднее выпрямленное напряжение становится меньше, чем в случае работы идеализированного выпрямителя с мгновенной коммутацией. Вольт-секундные площадки выпрямленного напряжения, которые исключаются из-за наличия процесса коммутации, на рис. 8, *а* заштрихованы. Подобное снижение U_d называют, исходя из его природы, индуктивным падением напряжения (ΔU_x). Среднее индуктивное падение напряжения для данной схемы определяется следующим образом:

$$\Delta U_x = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma}\sqrt{2}U_{2\text{ф}}\sin\vartheta d\vartheta = \frac{\sqrt{2}U_{2\text{ф}}}{\pi}\left[\cos\alpha - \cos(\alpha+\gamma)\right].$$

Используя уравнение коммутации (15), получаем зависимость, связывающую индуктивное падение напряжения в выпрямителе с током нагрузки:

$$\Delta U_x = \frac{I_d X_S}{\pi}. \tag{19}$$

Из выражения (19) видно, что характер зависимости индуктивного падения напряжения от тока нагрузки одинаков при всех углах управления. Среднее выпрямленное напряжение схемы определяется в данном случае следующей формулой:

$$U_d = U_{d0}\cos\alpha - \frac{I_d X_S}{\pi}.$$

Процесс коммутации оказывает влияние и на форму кривой напряжения на вентиле. На рис. 8, *в* показана кривая напряжения на вентиле В1. Форма кривой первичного тока i_1 может быть найдена следующим образом.

Во внекоммутационных интервалах мгновенные токи i_1 определяются точно так же, как и для идеализированного выпрямителя: $i_1 = I_d / k_\text{т}$. В интервале коммутации по обмоткам трансформатора протекают токи i_1, $i_{\text{В}1}$, $i_{\text{В}2}$. Для МДС обмоток трансформатора справедливо следующее уравнение (без учета намагничивающего тока):

$$i_1 w_1 = i_{\text{В}1} w_2 - i_{\text{В}2} w_2 = w_2(i_{\text{В}1} - i_{\text{В}2}),$$

т.е. форма кривой первичного тока в интервале коммутации определяется следующим выражением:

$$i_1 = \frac{w_2(i_{\text{В}1} - i_{\text{В}2})}{w_1} = \frac{1}{k_\text{т}}(i_{\text{В}1} - i_{\text{В}2}). \tag{20}$$

Кривая тока i_1 с учетом (20) построена на рис. 8, *г*.

Соотношения, описывающие процесс коммутации неуправляемого выпрямителя, могут быть легко получены из выведенных выше формул, если в них положить $\alpha = 0$.

Коммутация в однофазной мостовой схеме

Предположим, что в схеме управляемого выпрямителя, представленной на рис. 10, *а*, в интервале $0-\vartheta_1$ (рис. 10, *б*) проводили вентили В1 и В3.

В момент времени $\vartheta_1=\alpha$ отпирающие импульсы подаются на вентили В2 и В4, и они включаются. Вторичная обмотка трансформатора оказывается замкнутой накоротко мостом из четырех включенных вентилей. Естественно, что при этом, так же как и в рассмотренном ранее случае однофазной двухполупериодной схемы, во вторичной обмотке трансформатора протекает ток короткого замыкания $i_к$.

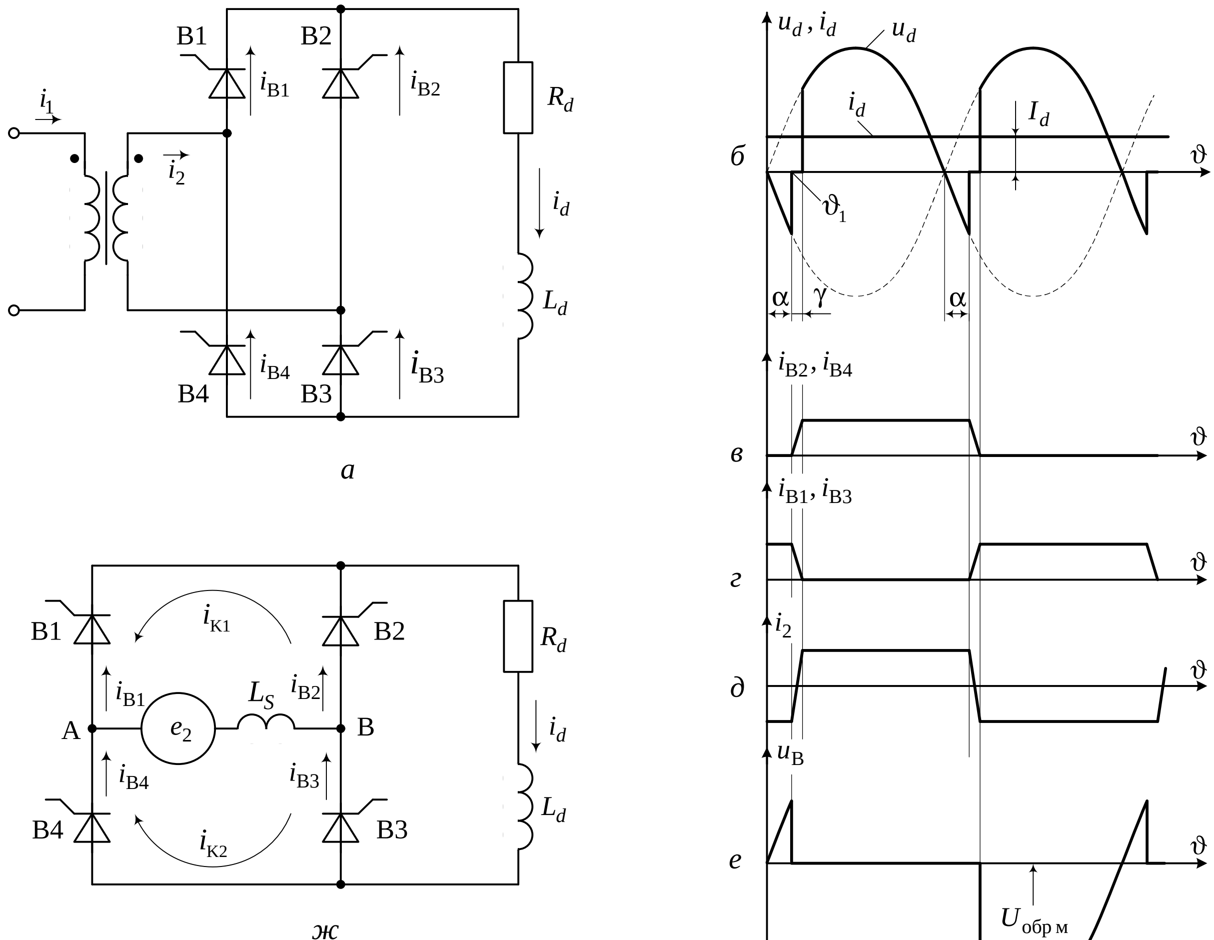

Рис. 10. Управляемый мостовой выпрямитель (*а*), временные диаграммы (*б*-*е*) и схема замещения (*ж*)

При рассмотрении процессов в данной схеме целесообразно несколько отступить от принятой ранее идеализации схемы и предположить, что вентили в прямом направлении обладают не нулевым, а очень малым конечным сопротивлением. Ток короткого замыкания в этом случае распределится поровну между парами вентилей, подключенных к выводам вторичной обмотки трансформатора. Таким образом, можно написать:

$$i_к = i_{к1} + i_{к2},$$
$$i_{к1} = i_{к2} = i_к/2. \qquad (21)$$

На рис. 10, *ж* изображена эквивалентная схема выпрямителя для интервала коммутации; стрелками показаны пути и направления протекания полного тока короткого замыкания $i_к$ и токов вентильных групп $i_{к1}$, $i_{к2}$.

Следует отметить, что в одной паре вентилей (В1 и В3) ток $i_к$ направлен навстречу существующему току и ведет к уменьшению тока этих вентилей, а в другой паре вентилей, вступающей в работу (В2 и В4), ведет к нарастанию тока.

Полный ток короткого замыкания $i_к$ определяется, как это было показано ранее, ЭДС вторичной обмотки трансформатора $e_2 = \sqrt{2}U_{2ф}\sin(\vartheta + \alpha)$ и приведенным эквивалентным реактивным сопротивлением $X_S = \omega L_S$:

$$i_к = \frac{\sqrt{2}U_{2ф}}{X_S}\left[\cos\alpha - \cos(\alpha + \vartheta)\right].$$

Токи $i_{к1}$ и $i_{к2}$ согласно (21) равны половине полного тока короткого замыкания

$$i_{к1} = i_{к2} = i_к / 2 = \frac{\sqrt{2}U_{2ф}}{2X_S}\left[\cos\alpha - \cos(\alpha + \vartheta)\right].$$

В вентилях, вступающих в работу, ток вентиля равен току $i_к$, а ток выключающихся вентилей равен $I_d - i_{к1}$:

$$i_{В2} = i_{В4} = i_{к1} = \frac{\sqrt{2}U_{2ф}}{2X_S}\left[\cos\alpha - \cos(\alpha + \vartheta)\right], \qquad (22)$$

$$i_{В1} = i_{В3} = I_d - i_{к1} = I_d - \frac{\sqrt{2}U_{2ф}}{2X_S}\left[\cos\alpha - \cos(\alpha + \vartheta)\right]. \qquad (23)$$

Уравнение коммутации можно получить из (23), подставив в него значение $i_{В1}$ в конце интервала коммутации ($i_{В1} = 0$; $\vartheta = \gamma$):

$$\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{2I_d X_S}{\sqrt{2}U_{2ф}}. \qquad (24)$$

На рис. 10, *в* и *г* показаны кривые токов в вентилях схемы.

Из выражений (22) и (23) может быть получена формула, определяющая форму тока i_2 вторичной обмотки трансформатора в коммутационный период. Для узлов А и В схемы рис. 10, *ж* можно записать следующие уравнения:

$$i_2 = i_{\text{В4}} - i_{\text{В1}} = i_{\text{В2}} - i_{\text{В3}}. \tag{25}$$

Подставив в (25) выражения (22) и (23), получим

$$i_2 = -I_d + \frac{\sqrt{2}U_{2\text{ф}}}{X_S}\left[\cos\alpha - \cos(\alpha+\vartheta)\right].$$

Так как при $\vartheta = \alpha$ $i_2 = -I_d$, а при $\vartheta = \alpha + \gamma$ $i_2 = +I_d$, то очевидно, что в интервале коммутации ток во вторичной обмотке меняется от $-I_d$ до $+I_d$. Во внекоммутационный период ток i_2 равен выпрямленному току I_d. Кривая i_2 приведена полностью на рис. 10, *д*.

Кривая первичного тока i_1 получается исходя из условия компенсации МДС первичной и вторичной обмоток:

$$i_1 = i_2 / k_{\text{т}}.$$

Отсюда следует, что кривая первичного тока i_1 по своей форме повторяет кривую вторичного тока.

Вследствие того, что вторичная обмотка выпрямительного трансформатора в периоды коммутации замкнута накоротко, мгновенные значения выпрямленного напряжения на этих интервалах равны нулю. Это приводит, так же как и в случае двухполупериодной схемы со средней точкой, к возникновению индуктивного падения напряжения ΔU_x, которое определяется следующим образом:

$$\Delta U_x = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} u_d\, d\vartheta = \frac{\sqrt{2}U_{2\text{ф}}}{\pi}\left[\cos\alpha - \cos(\alpha+\gamma)\right]. \tag{26}$$

Подставив в (26) $\left[\cos\alpha - \cos(\alpha+\gamma)\right]$ из (24), окончательно получим

$$\Delta U_x = 2 I_d X_S / \pi.$$

Среднее выпрямленное напряжение схемы равно

$$U_d = U_{d0}\cos\alpha - 2 I_d X_S / \pi.$$

Форма кривой выпрямленного напряжения U_d и кривая напряжения на одном из вентилей (В2) приведены на рис. 10, *б* и *е*.

Внешняя характеристика

В общем случае активно-индуктивной нагрузки выпрямителя однофазного тока, с которого мы начнем рассмотрение, в цепи нагрузки возможны три режима работы:

1) режим прерывистого выпрямленного тока ($\lambda < \pi$);

2) режим предельно-непрерывно тока ($\lambda = \pi$);

3) режим непрерывного тока ($\lambda > \pi$).

Прерывистый ток. Развертки тока и напряжений в выходной цепи выпрямителя по схеме рис. 11, *а* изображены на рис. 11, *б*.

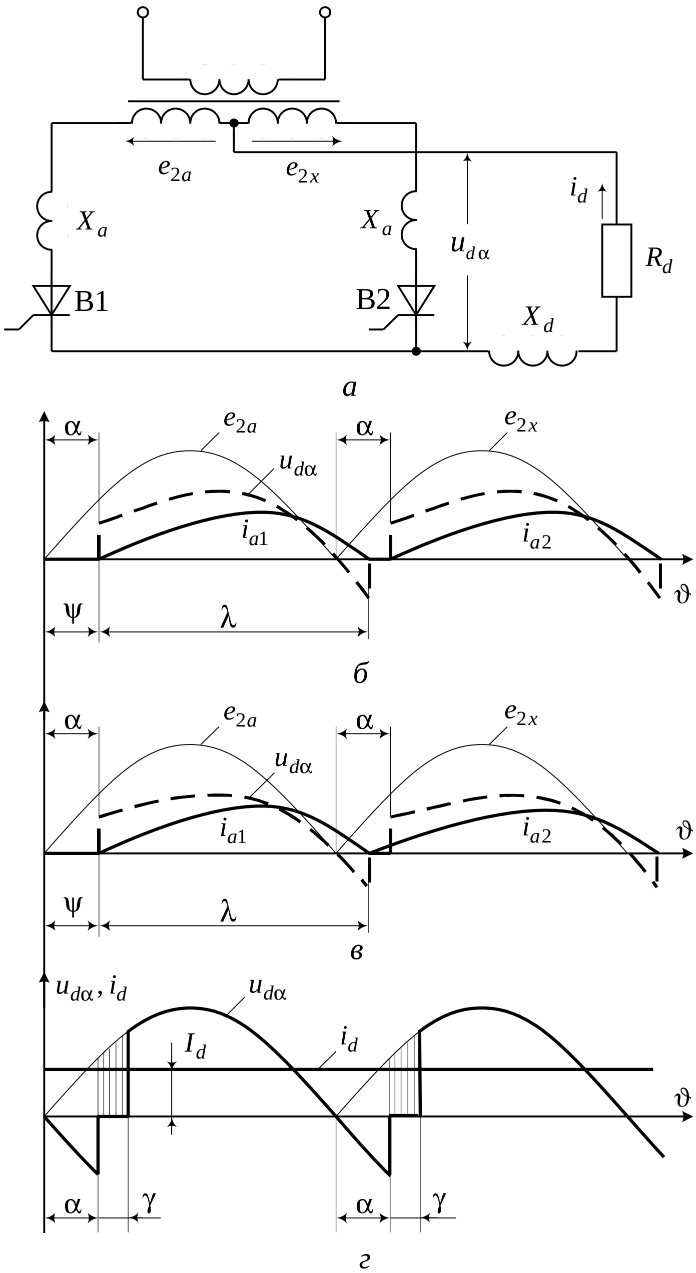

Рис. 11. Схема управляемого выпрямителя с выводом нулевой точки (*а*) и его временные диаграммы (*б-г*)

Так как ток одного вентиля спадает до нуля раньше, чем начинает проводить другой вентиль, выпрямленный ток будет содержать нулевые паузы. В таком режиме нет аналитического выражения для внешней характеристики, и она строится по точкам. Сначала вычислим среднее значение выпрямленного напряжения

$$
\begin{aligned}
U_{d\alpha} &= \frac{1}{\pi}\int_{\psi}^{\psi+\lambda} u_{d\alpha} d\vartheta = \frac{1}{\pi}\int_{\psi}^{\psi+\lambda} (e_2 - e_{Xd}) d\vartheta = \frac{1}{\pi}\int_{\psi}^{\psi+\lambda} e_2 d\vartheta = \\
&= \frac{1}{\pi}\int_{\psi}^{\psi+\lambda} \sqrt{2}E_2 \sin\vartheta d\vartheta = \frac{\sqrt{2}E_2}{\pi}[\cos\psi - \cos(\psi+\lambda)] = f_1(\psi,\lambda),
\end{aligned}
\tag{27}
$$

где ψ – угол отсчета начала проводимости вентиля относительно нуля синусоиды, здесь $\psi = \alpha$.

Для того чтобы выразить длительности протекания анодного тока λ через параметры схемы $\left(\alpha,\ \frac{X_a + X_d}{R_d}\right)$, найдем уравнение для анодного тока вентиля. Дифференциальное уравнение для анодного тока на участке проводимости вентиля:

$$
\left(X_a + X_d\right)\frac{di_a}{d\vartheta} + i_a R_d = \sqrt{2}E_2 \sin\vartheta .
$$

Его решение

$$
i_a = i_{a\text{пр}} + i_{a\text{св}} = \frac{\sqrt{2}E_2}{z_d}\sin(\vartheta - \varphi) + Ae^{\frac{\vartheta-\varphi}{\omega\tau}}, \tag{28}
$$

где постоянная интегрирования A определяется из начальных условий

$$
i_a\big|_{\vartheta=\psi} = 0 .
$$

Тогда, подставляя это условие в уравнение (28), получим

$$
0 = \frac{\sqrt{2}E_2}{z_d}\sin(\psi - \varphi) + A,
$$

откуда

$$
A = -\frac{\sqrt{2}E_2}{z_d}\sin(\psi - \varphi),
$$

и окончательное решение для тока

$$
i_a = \frac{\sqrt{2}E_2}{z_d}\sin(\vartheta - \varphi) - \frac{\sqrt{2}E_2}{z_d}\sin(\psi - \varphi)e^{\frac{\vartheta-\varphi}{\omega\tau}}, \tag{29}
$$

где

$$
z_d = \sqrt{(X_a + X_d)^2 + R_d^2}\,;\ \varphi = \operatorname{arctg}\frac{X_a + X_d}{R_d}\,;\ \tau = \frac{X_a + X_d}{R_d}.
$$

Уравнение для определения λ получим из выражения (29), положив $i_a\big|_{\vartheta=\psi+\lambda}=0$,

$$\frac{\sqrt{2}E_2}{z_d}\left[\sin(\psi+\lambda-\varphi)-\sin(\psi-\varphi)e^{\frac{\vartheta-\varphi}{\omega\tau}}\right]=0. \qquad (30)$$

Уравнение (30) трансцендентно относительно λ. На рис. 12 представлены результаты его численного решения.

Диапазон изменения λ в режиме прерывистого тока ограничен с одной стороны значением π, а с другой – значением (π – ψ), соответствующим случаю чисто активной нагрузки. Тогда методика построения внешней характеристики в области прерывистого режима будет следующей ψ = const:

1) зададим λ, $(\pi-\psi)<\lambda_1<\pi$;

2) определим $U_{d\alpha(1)}$ по уравнению (27);

3) определим по графику (рис. 12) значение $\left(X_a+X_d\right)/R_d$, соответствующее данным ψ и λ_1;

4) вычислим значение R_{d1} по известному из п. 3 отношению $\left(X_a+X_d\right)/R_d$ и заданным X_a и X_d;

5) вычислим среднее значение выпрямленного тока $I_{d(1)}=U_{d\alpha(1)}/R_{d1}$;

6) нанесем точку внешней характеристики $U_{d\alpha(1)}$ и $I_{d(1)}$ на график;

7) задаваясь новым значением λ_2, повторим расчет и по точкам построим всю внешнюю характеристику в этом режиме.

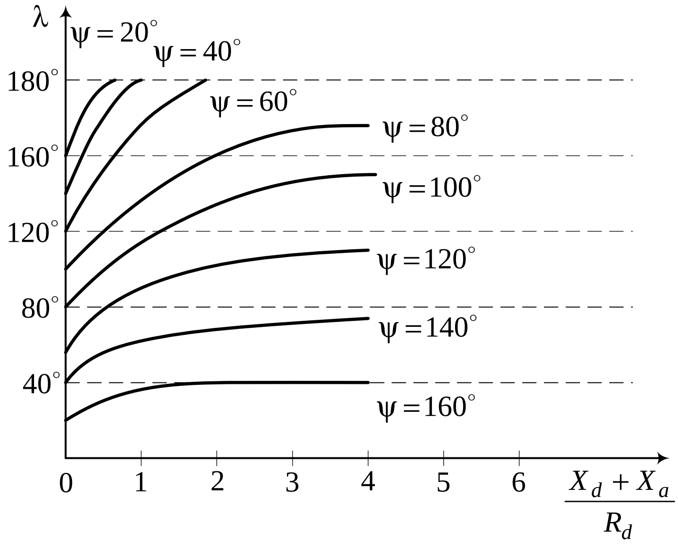

Рис. 12. Зависимости длительности протекания тока λ от соотношения индуктивного и активного сопротивлений

Предельно-непрерывный ток. Длительность протекания тока в этом режиме равна π, и, рассматривая этот режим как крайний случай предыдущего режима, т.е. полагая в уравнении (27) λ = π, получим критическое напряжение

$$U_{d\alpha\text{кр}} = \frac{\sqrt{2}E_2}{\pi}\left[\cos\psi - \cos(\psi+\pi)\right] = \frac{2\sqrt{2}E_2}{\pi}\cos\psi = E_{d0}\cos\psi. \quad (31)$$

Из диаграммы для тока на рис. 11, *в* следует, что в этом режиме момент включения вентиля совпадает с моментом прохождения через ноль принужденной составляющей анодного тока, т.е.

$$\psi = \varphi_{\text{кр}} = \operatorname{arctg}\left(\frac{X_a + X_d}{R_d}\right)_{\text{кр}}.$$

Откуда

$$R_{d\text{кр}} = \frac{X_a + X_d}{\operatorname{tg}\psi}.$$

Среднее значение выпрямленного тока при этом, тоже называемое критическим, будет равно

$$I_{d\text{кр}} = \frac{U_{d\alpha\text{кр}}}{R_{d\text{кр}}} = \frac{E_{d0}\cos\psi\operatorname{tg}\psi}{X_a + X_d} = \frac{E_{d0}}{X_a + X_d}\sin\psi. \quad (32)$$

Уравнения (31) и (32) задают в параметрической форме уравнение эллипса с большой полуосью E_{d0} и малой полуосью $E_{d0}/(X_a + X_d)$, которое и будет границей между режимом прерывистого и непрерывного тока нагрузки (рис. 13).

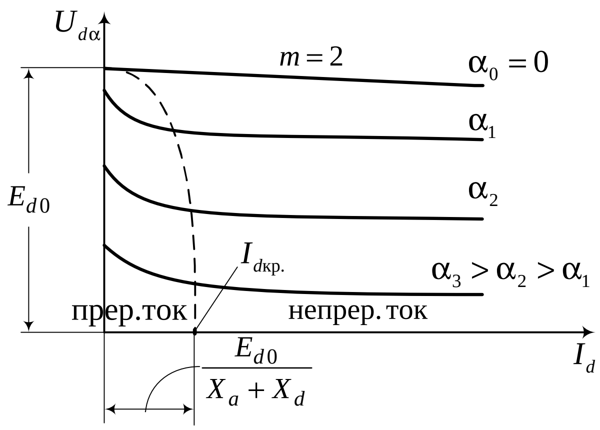

Рис. 13. Внешние характеристики управляемого выпрямителя

Непрерывный ток. В этом режиме очередной вентиль вступает в работу прежде, чем спадет до нуля ток в предыдущем вентиле, поэтому появляется участок совместной работы двух вентилей (коммутационный участок). Из-за усложнения (громоздкости) точного анализа в этом случае применяют приближенное определение внешней характеристики на основе допущения о малости пульсации выпрямленного тока, т.е. считая $X_d = \infty$. Кривые выпрямленного напряжения и выпрямленного тока для этого случая показаны на рис. 11, *г*. На интервале коммутации кривая мгновенных значений выпрямленного напряжения идет по полусумме фазных ЭДС, участвующих в коммутации, что легко устанавливается методом наложения. Снижение выпрямленного напряжения при росте тока нагрузки обусловлено ростом угла коммутации γ, а вместе с ним и потерь напряжения на коммутацию, мгновенные значения которого показаны штриховкой на рис. 11, *г*. Тогда среднее значение выпрямленного напряжения (под нагрузкой) будет равно среднему значению выпрямленной ЭДС (при γ = 0) за вычетом коммутационного падения напряжения

$$U_{d\alpha} = E_{d\alpha} - \Delta U_x = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\pi} \sqrt{2}E_2 \sin\vartheta d\vartheta - \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \Delta U_x d\vartheta =$$

$$= \frac{\sqrt{2}E_2}{\pi}\cos\alpha - \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} X_a \frac{di_a}{dt} d\vartheta = E_{d0}\cos\alpha - \frac{I_d X_a}{\pi}.$$

В режиме непрерывного тока внешние характеристики для различных α идут параллельно (см. рис. 13). Это объясняется тем, что процесс коммутации связан с передачей энергии магнитного поля из индуктивности рассеяния фазы трансформатора, выходящей из работы, в индуктивность рассеяния фазы, вступающей в работу. Величина накопленной энергии определяется только величиной индуктивности и значением тока в ней.

3. Рабочее задание и методические указания

1. Снять регулировочную характеристику $U_{d\alpha} = f(\alpha)$ при работе на активную нагрузку. Для этого переключатель рода нагрузки (см. рис. 1) установить в положение $L_d = 0$, шунтировать индуктивность во вторичной цепи трансформатора. При угле регулирования $\alpha = 0$ установить $R_{d\min}$. Изменяя угол регулирования α, снять указанную характеристику. Результаты измерений оформить в виде табл. 1.

Таблица 1

Схема	Режим	Режим регулирования, эл. град.				
		30	60	90	120	
Однофазная с нулевой обмоткой	$X_d = 0$ $X_\alpha = \infty$					
Мостовая несимметричная	$X_d = 0$ $X_\alpha = \infty$					

2. Снять регулировочную характеристику при работе схемы на активно-индуктивную нагрузку. Переключатель S_2 установить в положение $L_d \neq 0$. Порядок выполнения аналогичен указанному в п. 1.

3. Пользуясь осциллографом, определить момент наступления начально-непрерывного режима и отметить соответствующий угол регулирования $\alpha_{\text{гр}}$. Для произвольно выбранного угла регулирования $\alpha_1 < \alpha_{\text{гр}}$ рассчитать и построить теоретическую кривую тока нагрузки i_d и сравнить её с экспериментальной. Для расчета принять $\varphi_{\text{нагр}} = \alpha_{\text{гр}}$. Результаты свести в табл. 2.

Таблица 2

ϑ, эл. град	i_d теор., А	i_d эксп., А

4. Для участка прерывистого тока нагрузки рассчитать теоретическую регулировочную характеристику и сравнить ее с экспериментальной. Угол проводимости определяется путем решения уравнения $i_d(\lambda) = 0$.

5. Снять внешние характеристики $U_d = f(I_d)$ при $L_d = 0$, $L_S = 0$ и $L_d \neq 0$, $L_S \neq 0$ для двух значений угла регулирования $\alpha = 0$ и $\alpha = 30 \div 60°$. Для этого при выбранном угле α установить с помощью R_d минимально возможный ток. Увеличивая ток нагрузки, снять характеристику $U_d = f(I_d)$. Результаты измерений занести в табл. 3.

Таблица 3

	Активная нагрузка	Активно-индуктивная нагрузка	
		$X_a = 0$	$X_a \neq 0$
I_d, А			
U_{d0}, В			
$U_{d\alpha}$, В			

6. Для произвольно выбранного угла регулирования $\alpha = 60 \div 90°$ с помощью электронного осциллографа рассмотреть и зарисовать формы токов и напряжений всех элементов схемы: u_d, u_2, $u_{ак}$, i_d, i_2, i_a, i_1 – для случаев нагрузки п. 5.

7. Выполнить в указанной последовательности исследование мостовой схемы. Для этого переключатель схем установить в положение «мостовая схема» (п. 3, 4 не выполнять).

8. Произвести сравнительную оценку схем выпрямления и сделать краткие выводы. Отметить влияние характера нагрузки на энергетические показатели, регулировочные характеристики и форму напряжений и токов.

4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Изображение схем исследуемых выпрямителей.
2. Таблицы измерений и вычислений.
3. Графики характеристик, построенные по результатам измерений и расчетов.
4. Осциллограммы напряжений и токов в исследуемых схемах.
5. Заключение и выводы по результатам работы.

5. Контрольные вопросы для допуска к работе

1. Для заданного выпрямителя приведите кривые выходного напряжения, напряжения анод-катод для указанного режима работы.
2. Как отличаются кривые токов анодного, вторичного и первичного токов при $\gamma = 0$, $\gamma \neq 0$?
3. Как экспериментально определяется угол коммутации γ?
4. Как выглядят внешние характеристики управляемого выпрямителя?
5. Как влияют параметры схемы и нагрузки на угол коммутации γ?
6. Чему равно соотношение параметров $\frac{U_d}{2}$, $\frac{I_d}{I_a}$?
7. Как экспериментально определить X_a?
8. Какие схемы выпрямителей используются в работе и как изменяют величину и характер нагрузки выпрямителей?
9. Что показывают измерительные приборы?

6. Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Изобразите и поясните временные диаграммы токов и напряжения на нагрузке для заданной схемы выпрямления при $\alpha = 90°$, $X_d = \infty$.

2. Изобразите регулировочную характеристику выпрямителя при индуктивно-активной нагрузке с достаточно большой индуктивностью в цепи выпрямленного тока.

3. Изобразите внешние характеристики выпрямителя $U_{d\alpha}/U_{d0} = f(I_d/I_{dn})$ для углов $\alpha = 0, 30, 60°$.

4. Как определяется фазовый сдвиг первой гармонической тока в простой двухфазной схеме выпрямления в режиме $X_d = \infty$.

5. Как определяется фазовый сдвиг первой гармонической тока в однофазной мостовой несимметричной схеме выпрямления в режиме $X_d = \infty$.

6. Каковы достоинства и недостатки исследуемых схем выпрямителей?

7. Определите амплитуду обратного напряжения в двухполупериодной схеме с выводом нулевой точки (мостовой) если $u_2 = 100$ В.

8. Почему при малых токах напряжение нагрузки увеличивается?

Список рекомендуемой литературы

1. *Руденко В.С.* Основы преобразовательной техники / В.С. Руденко, В.И. Сенько, И.М. Чиженко. М.: Высш. шк., 1980. 424 с.

2. *Полупроводниковые* выпрямители / под ред. Ф.И. Ковалева, Г.П. Мостковой. М.: Энергия, 1978. 447 с.

3. *Попков О.З.* Основы преобразовательной техники. Управляемые сетевые преобразователи: конспект лекций / О.З. Попков. М.: Изд-во МЭИ, 2001. 48 с.

Оглавление

Лабораторная работа ПТ4. Однофазные управляемые выпрямители 3
1. Описание лабораторной установки 3
2. Теоретические сведения 4
2.1. Работа управляемого выпрямителя на активную нагрузку 4
2.2. Работа управляемого выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку 8
2.3. Работа управляемого выпрямителя с нулевым вентилем 10
2.4. Однофазная мостовая схема 12
2.5. Однофазная схема с неполным числом управляемых вентилей при работе на активно-индуктивную нагрузку 18
2.6. Процессы коммутации в управляемом выпрямителе с реальным трансформатором 22
3. Рабочее задание и методические указания 36
4. Содержание отчета 38
5. Контрольные вопросы для допуска к работе 38
6. Контрольные вопросы к защите лабораторной работы 39
Список рекомендуемой литературы 39