Лабораторная работа 1
ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОМОЩНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ОДНОФАЗНОГО ТОКА

Цель работы – изучение основных схем, характеристик и параметров маломощных выпрямителей однофазного тока.

1.1. Необходимые исходные сведения

Классификация выпрямителей. Выпрямителем называется устройство, в котором с помощью вентилей (диодов) осуществляется преобразование знакопеременного периодически изменяющегося входного напряжения питающей сети в однополярное выходное напряжение, имеющего вид

$$u\,(t) = U_0 + u_{\sim}(t), \qquad (1)$$

где U_0 – среднее значение выпрямленного напряжения; $u_{\sim}(t)$ – переменная составляющая напряжения на выходе выпрямителя, являющаяся периодической функцией времени, среднее значение которой за период его колебаний равно нулю.

Уровень пульсации выпрямленного напряжения определяется амплитудным значением $U_{\sim m}$ функции $u_{\sim}(t)$. Частота f_d этих пульсаций кратна частоте f изменения напряжения питающей сети переменного тока $f_d = m\,f$, где m – целое число, зависящее от особенностей схемы выпрямителя.

Выпрямители обычно состоят из соединённых последовательно трансформатора, диодной схемы и сглаживающего фильтра.

В зависимости от числа фаз источника питания переменного тока различают выпрямители *однофазного и многофазного* (обычно трехфазного) тока.

По характеру процессов, происходящих в трансформаторе выпрямителя, они делятся на однотактные и двухтактные.

Однотактными называются такие выпрямители, в которых во вторичной обмотке трансформатора ток протекает один раз за период и только в одном направлении в течение одного из полупериодов изменения входного напряжения на первичной его обмотке.

Двухтактными называют такие схемы выпрямителей, в которых во вторичной обмотке трансформатора ток протекает в течение всего периода изменения входного напряжения, причём

направления протекания тока в полупериодах противоположны друг другу. Выпрямители могут быть управляемыми (с регулируемым выпрямленным напряжением) и неуправляемыми.

В выпрямителях применяются *конденсаторные* (емкостные), *дроссельные* (индуктивные) и *дроссельно-конденсаторные* (индуктивно-емкостные) *сглаживающие* фильтры. Конденсатор соединяется параллельно с нагрузкой, а дроссель – последовательно с нагрузкой.

Сглаживающие фильтры призваны оказывать большое (индуктивные фильтры) или малое (емкостные фильтры) сопротивления переменному току и наоборот – постоянному току. Поэтому использование сглаживающих фильтров позволяет значительно снизить пульсации напряжения на нагрузке. Емкостный фильтр является характерным для выпрямителей малой мощности. Индуктивный фильтр в основном применяется в выпрямителях с большими токами нагрузки.

Схемы, параметры и характеристики выпрямителей. В зависимости от вида диодной схемы однофазные выпрямители называются *однодиодными* (рис. 1.1), *двухдиодными со средней точкой* (рис. 1.2), *четырёхдиодными мостовыми* (рис. 1.3) и др. На схемах стрелками показаны условные положительные направления токов и напряжений, а символом «*» обозначены одноименные полюса напряжений на зажимах обмоток трансформатора (начала обмоток).

Выпрямитель характеризуется выходными параметрами, а также параметрами режимов работы диодов и трансформатора.

К *выходным параметрам* выпрямителя относятся:

$U_{0\text{ном}}$ – номинальное среднее значение выпрямленного напряжения; $I_{0\text{ном}}$ – номинальное среднее значение выпрямленного тока;

$k_{\text{п}}$ – коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения; $k_{\text{п}} = \dfrac{U_{\sim m}}{U_0}$;

$f^{(1)}$ – частота основной гармоники выпрямленного напряжения; $f^{(1)} = f_d$;

$R_{вых}$ – выходное (внутреннее) сопротивление; $R_{вых} = \left|\Delta U_0 / \Delta I_0\right|$, где ΔU_0 – уменьшение выходного напряжения, обусловленное возрастанием тока нагрузки на значение ΔI_0.

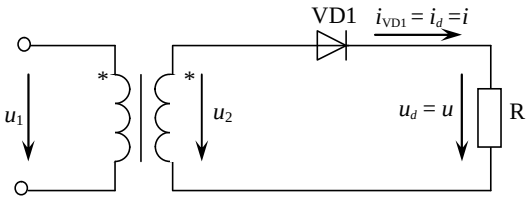

Рис. 1.1

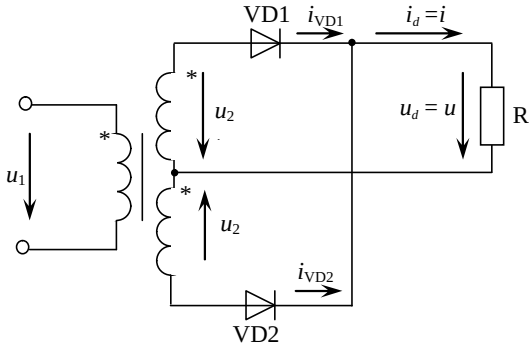

Рис. 1.2

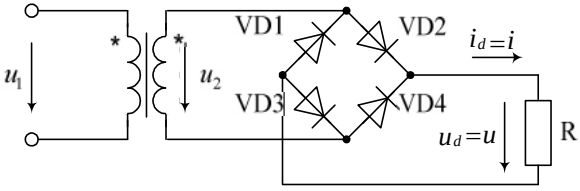

Рис. 1.3

Внешней (нагрузочной) характеристикой выпрямителя является зависимость напряжения U_0 на его выходе от тока нагрузки I_0.

Параметрами режима работы диодов, определяющими их выбор, являются:

$I_{\text{VD}}^{(+)}$ – среднее значение прямого тока за период изменения входного напряжения;

$I_{\text{VD}\max}^{(+)}$ – наибольшее мгновенное значение прямого тока;

$U_{\text{VD}\max}$ – наибольшее мгновенное значение обратного напряжения;

P_{VD} – среднее за период изменения входного напряжения диодной схемы значение мощности потерь энергии в диоде.

Здесь и далее верхний индекс (+) соответствует проводящему состоянию диодов, а (-) – закрытому.

Параметрами режима работы трансформатора являются:

U_1 (I_1) – действующее значение напряжения (тока) в первичной обмотке;

U_2 (I_2) – действующее значение напряжения (тока) во вторичной обмотке;

S_1 (S_2) – полная мощность, передаваемая через первичную (вторичную) обмотки;

S_T – расчетная мощность трансформатора; $S_\text{T} = (S_1 + S_2)/2$;

P_1 – активная мощность, потребляемая от сети;

χ – коэффициент мощности; $\chi = P_1/S_1$.

Однотактный выпрямитель с индуктивным фильтром. В схеме выпрямителя (рис. 1.4) и осциллограммах напряжений и токов (рис. 1.5) напряжения u_{21} и u_{22} на половинах вторичной обмотки трансформатора изменяются в противофазе, причем в идеальном случае $|u_{21}| = |u_{22}|$. В интервале времени от 0 до $T/2$ выполняются неравенства $u_{21} > 0$, $u_{22} < 0$, поэтому диод VD1 открыт, а диод VD2 закрыт. Напряжение на выходе диодной схемы определяется выражением $u_d = u_{21} - u_{\text{VD1}}^{(+)}$, где $u_{\text{VD1}}^{(+)}$ – падение напряжения на открытом диоде VD1. Если считать, что диоды

идеальны ($u_{VD}^{(+)} = 0$, $i_{VD}^{(-)} = 0$), то $u_d = u_{21}$. В большинстве случаев выполняется условие $u_{21} >> u_{VD}^{(+)}$, тогда $u_d \approx u_{21}$.

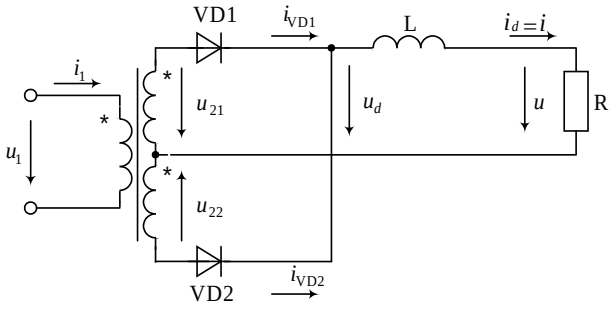

Рис.1.4

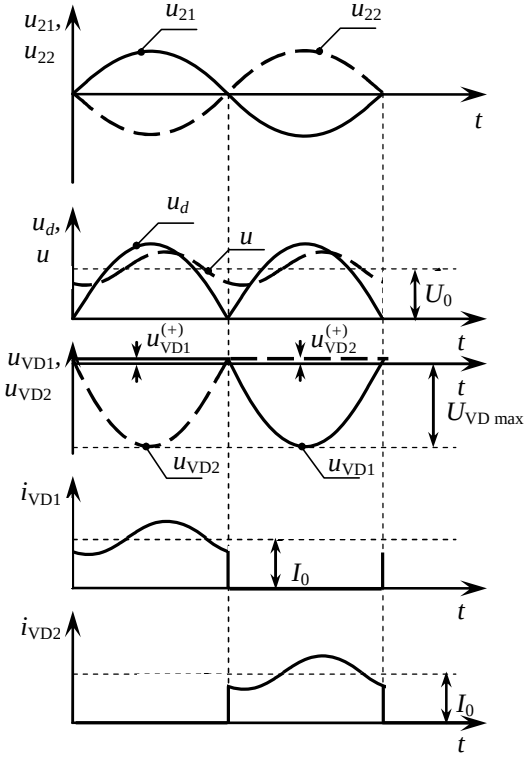

Рис. 1.5

В рассматриваемом интервале времени на диоде VD2 действует запирающее напряжение отрицательной полярности:

$$u_{\text{VD2}}^{(-)} = -\left(u_d - u_{22}\right); \quad \left|u_{\text{VD2}}^{(-)}\right| = \left|u_d\right| + \left|u_{22}\right|,$$

так как потенциал катода диода VD2 относительно нулевого вывода трансформатора $u_d > 0$, а потенциал его анода $u_{22} < 0$. В случае допущения идеальности диода справедливо

$$\left|u_{\text{VD2}}^{(-)}\right| = \left|u_{21}\right| + \left|u_{22}\right|.$$

В следующем полупериоде изменения входного напряжения выполняются неравенства $u_{22} > 0$, $u_{21} < 0$, поэтому диод VD2 открыт, а диод VD1 закрыт. При этом $u_d = u_{22} - u_{\text{VD2}}^{(+)}$ и к диоду VD1 приложено запирающее напряжение

$$u_{\text{VD1}}^{(-)} = -\left(u_d - u_{21}\right); \quad \left|u_{\text{VD1}}^{(-)}\right| = \left|u_d\right| + \left|u_{21}\right|.$$

Выпрямленный ток $i(t)$ в нагрузке содержит постоянную I_0 и переменную $i_{\sim}(t)$ составляющие: $i(t) = I_0 + i_{\sim}(t)$. Амплитуда $I_{\sim m}$ переменной составляющей тем меньше, чем больше значение индуктивности L.

Среднее значение U_0 выпрямленного напряжение $u(t)$ на выходе выпрямителя определяется соотношением

$$U_0 = U_0^* - \Delta U_{\text{T}} - \Delta U_{\text{VD}} - \Delta U \ , \qquad (2)$$

где U_0^* – среднее значение на выходе выпрямителя в предположении, что трансформатор и диоды являются идеальными и сопротивления монтажных проводов и провода обмотки дросселя равны нулю; ΔU_{T}, ΔU_{VD} и $\Delta U_{\text{п}}$ – соответственно средние значения потерь напряжения в трансформаторе, диодной схеме и проводах схемы выпрямителя.

В случае синусоидального закона изменения напряжения $u_1(t)$ питающей сети U_0^* по определению выражается формулой

$$U_0^* = \frac{1}{T_d}\int_{t}^{t+T_d} u(t)\,dt = \frac{2}{T}\int_{0}^{T/2} \sqrt{2}\cdot U_2 \sin \omega t dt = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0,9 U_2 , \quad (3)$$

где T_d – период изменения напряжений $u_d(t)$ и $u(t)$; $T_d = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f}$; T – период колебаний синусоидального напряжения $u_1(t)$; U_2 – действующее значение напряжений $u_{21} = u_{22}$; для случая идеального трансформатора $U_2 = U_1 \frac{w_2}{w_1}$; $w_1, (w_2 = w_{21} = w_{22})$ – количество витков первичной (вторичной) обмоток трансформатора.

Значение ΔU_{T} обусловлено падениями напряжения на активных ($\Delta U_{\text{T}r}$), индуктивных ($\Delta U_{\text{T}x}$) сопротивлениях первичной (r_1, x_1) и вторичной (r_2, x_2) обмоток трансформатора. Индуктивные сопротивления x_1 и x_2 обусловлены наличием магнитных потоков рассеяния трансформатора.

В трансформаторах малой мощности обычно выполняется условие $U_{\text{T}r} >> U_{\text{T}x}$. Тогда, пренебрегая сопротивлениями x_1 и x_2 и током намагничивания трансформатора, значение $\Delta U_{\text{T}r}$ можно оценить по формуле

$$\Delta U_{\text{T}r} \approx r_{\text{T}} I_0 ,$$

где I_0 – среднее значение тока $i(t)$ на выходе выпрямителя; $I_0 = U_0 / R$; r_{T} – результирующее значение активного сопротивления обмоток трансформатора; $r_{\text{T}} = r^*_{\text{T}1} + r_{\text{T}2}$. Здесь $r^*_{\text{T}1}$ – приведенное ко вторичной обмотке трансформатора значение активного сопротивления первичной обмотки трансформатора

$$r^*_{\text{T}1} = r_{\text{T}1} (w_2 / w_1)^2 .$$

Значение коэффициента пульсаций $k_{\text{п}}$ можно оценить исходя из приближения

$$U_{\sim m} \approx U^{(1)}_m ,$$

где $U^{(1)}_m$ – амплитуда первой гармоники разложения напряжения $u(t)$ в ряд Фурье. Такое допущение оправдано тем, что гармоники второго и более высокого порядка имеют существенно меньшие амплитуды по сравнению с первой гармоникой.

В рассматриваемой схеме (см. рис. 1.4) частота колебания первой гармоники $f^{(1)}$ выходного напряжения определяется соотношением

$$f^{(1)} = f_d = 2f\,.$$

Напряжение $u(t)$ на выходе делителя напряжения, состоящего из элементов L и R, определяется формулой

$$U_m^{(1)} = U_{dm}^{(1)} \frac{R}{\sqrt{(2\omega L)^2 + R^2}}, \qquad (4)$$

где $U_{dm}^{(1)}$ – амплитуда первой гармоники разложения в ряд Фурье выпрямленного напряжения $u_d(t)$.

Если принять, что трансформатор и диоды идеальны, то

$$U_{dm}^{(1)} = \frac{4}{3\pi}\sqrt{2}\cdot U_2 = \frac{2}{3}U_0^*. \qquad (5)$$

Тогда

$$k_{\text{п}} \approx \frac{2}{3}\frac{U_m^{(1)}}{U_{dm}^{(1)}} = \frac{2}{3}\frac{1}{\sqrt{(2\omega L/R)^2 + 1}}. \qquad (6)$$

Например, если $\omega L << R$, то $k_{\text{п}} = \frac{2}{3} \approx 0{,}67$.

Однотактный выпрямитель с емкостным фильтром. В схеме выпрямителя (рис. 1.6) конденсатор C фильтра соединён параллельно с сопротивлением R нагрузки выпрямителя.

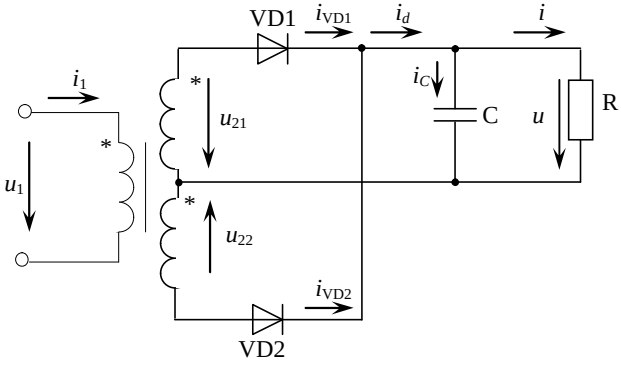

Рис. 1.6

Диод VD1 открыт в течение интервала времени (t_1 , t_2), когда значение ЭДС половины вторичной обмотки трансформатора больше, чем напряжение на конденсаторе (рис. 1.7).

Ток диода VD1 без учета индуктивного сопротивления обмоток и тока намагничивания трансформатора определяется по выражению

$$i_{\mathrm{VD1}} \approx \frac{u_{21} - u - u_{\mathrm{VD1}}^{(+)}}{r_{\mathrm{T}}} \approx \frac{u_{21} - u}{r_{\mathrm{T}}}, \qquad (7)$$

где $u_{21} = u_1 w_{21} / w_1$; r_{T} – активное сопротивление обмоток трансформатора.

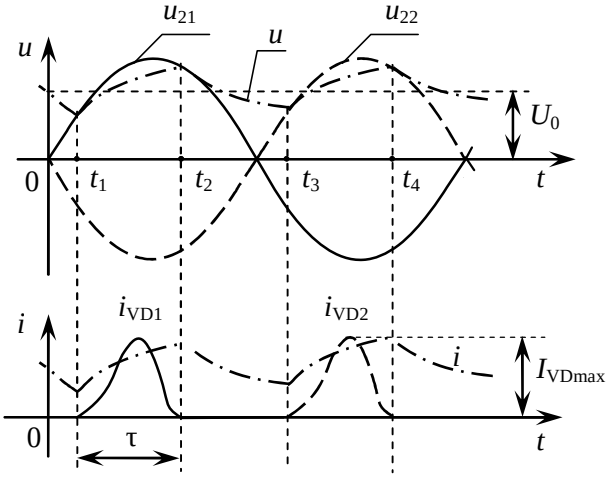

Рис. 1.7

В течение этого интервала времени конденсатор С заряжается током

$$i_{\mathrm{C}} = i_{\mathrm{VD1}} - \frac{u_{\mathrm{C}}}{R}.$$

В момент времени t_2 диод VD1 закрывается. В течение интервала времени (t_2 , t_3) диоды закрыты, поскольку к диоду VD1 приложено обратное напряжение $u_{\mathrm{VD1}}^{(-)} = -(u - u_{21})$, а к диоду VD2 – обратное напряжение $u_{\mathrm{VD2}}^{(-)} = -(u - u_{22})$. В течение этого

интервала времени конденсатор С разряжается через сопротивление *R* нагрузки, поэтому $|i_C| = |i|$. В интервале времени (t_3 , t_4), когда $u_{22} > u_C$, открыт диод VD2 и ток в нем определяется аналогично выражению (7):

$$i_{VD2} \approx \frac{u_{22} - u_C - u_{VD2}^{(+)}}{r_T} . \qquad (8)$$

Одной из особенностей работы выпрямителя на емкостную нагрузку является то, что длительность интервала времени $\tau = t_2 - t_1 \approx t_4 - t_3$, в течение которого к одному из диодов приложено напряжение положительной полярности и через него протекает прямой ток, меньше половины периода изменения входного напряжения $\tau < T/2$. Поскольку среднее значение тока через конденсатор равно нулю, то справедливо

$$I_0 = \frac{2}{T}\int_{t_1}^{t_2} i_{VD1} dt . \qquad (9)$$

В выражениях (8) и (9) при уменьшении сопротивления r_T амплитуда импульсов тока диода $I_{VD\,max}$ увеличивается, а длительность τ импульсов тока уменьшается.

Для приближенного расчета *внешней характеристики* можно допустить, что диоды являются идеальными, а в (8) принять $u_C \approx U_0$=const. При этих допущениях с учётом отсчета времени от момента, соответствующего амплитудному значению синусоиды ЭДС вторичной обмотки трансформатора, из (8) для интервала времени τ следует

$$i_{VD} \approx \frac{1}{r_T}\left(\sqrt{2}\cdot U_2 \cos\omega t - U_0\right), \qquad (10)$$

$$U_0 = \sqrt{2}\cdot U_2 \cos\theta , \qquad (11)$$

где θ = 0,5ωτ.

Тогда из (9), (10) и (11) следует выражение для функции $I_0 = \psi(U_0)$, являющейся обратной по отношению к функции $U_0 = \varphi(I_0)$, которая является внешней характеристикой выпрямителя:

$$I_0 \approx \frac{2\sqrt{2}\cdot U_2}{\pi r_{\mathrm{T}}}\left(\sin\theta - \theta\cos\theta\right). \qquad (12)$$

Выражения (11) и (12) в неявной форме описывают внешнюю характеристику выпрямителя $U_0 = \varphi(I_0)$. Её можно построить, задаваясь значениями U_0 и рассчитывая затем соответствующие значения θ по (11) и токи нагрузки I_0 по выражению (12).

Коэффициент пульсаций выпрямителя приближенно находится с учётом допущения, что переменная составляющая выходного тока диодной схемы полностью проходит через конденсатор. Это допущение оправдано тем, что обычно выполняется условие $R >> x_{\mathrm{C}}^{(1)}$, где $x_{\mathrm{C}}^{(1)}$ – реактивное сопротивление конденсатора для первой гармоники тока; $x_{\mathrm{C}}^{(1)} = \dfrac{1}{2\omega C}$.

Тогда амплитуда первой гармоники напряжения на конденсаторе (на нагрузке) по закону Ома составит

$$U_{\mathrm{C}m}^{(1)} = \frac{I_{dm}^{(1)}}{2\omega C},$$

где $I_{dm}^{(1)}$ – амплитуда первой гармоники тока на выходе диодной схемы. Из (10) и формулы разложения функции $i_{\mathrm{VD}}(t)$ в ряд Фурье следует

$$I_{dm}^{(1)} = \frac{4}{T}\int_{-\tau/2}^{\tau/2} i_{\mathrm{VD}}\left(\cos 2\omega t\right)dt = \frac{U_0}{r_{\mathrm{T}}}H\left(\theta\right),$$

где $H(\theta) = 2\dfrac{\sin m\theta\cos\theta - m\cos m\theta\sin\theta}{\pi\left(m^2-1\right)\cos\theta}$; m – кратность частоты пульсации выходного напряжения (для рассматриваемой схемы $m = 2$).

Следовательно, приближенно коэффициент пульсаций выходного напряжения для схемы на рис. 1.6 определяется формулой

$$k_{\text{п}} \approx \frac{U_{\text{C}m}^{(1)}}{U_0} = \frac{H(\theta)}{2\omega r_{\text{T}} C}. \qquad (13)$$

При увеличении тока нагрузки I_0 возрастает амплитуда $I_{\text{VD max}}$ и длительность импульсов τ тока диодов, поэтому увеличивается и амплитуда пульсаций выходного напряжения.

Однотактный выпрямитель с индуктивно-емкостным фильтром. В схеме выпрямителя (рис. 1.8) кривая напряжения на входе фильтра u_d, так же как и в схеме рис. 1.5, складывается из положительных полуволн кривых ЭДС половин вторичной обмотки трансформатора u_{21} и u_{22}.

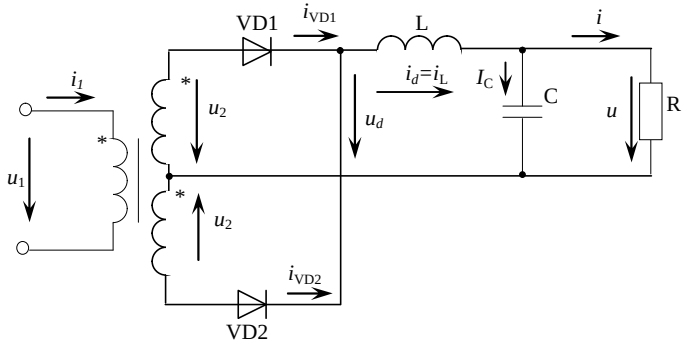

Рис. 1.8

При определении коэффициента пульсации выпрямителя амплитуду переменной составляющей тока дросселя i_{L} можно считать примерно равной амплитуде первой её гармоники, равной $I_{\text{L}m}^{(1)}$. Обычно выполняются условия

$$\frac{1}{2\omega C} << 2\omega L \; ; \quad \frac{1}{2\omega C} << R \, .$$

Тогда амплитуда первой гармоники тока $i_{\text{L}}(t)$ будет иметь вид

$$I_{\text{L}m}^{(1)} = \frac{U_{dm}^{(1)}}{2\omega L}, \qquad (14)$$

где $U_{dm}^{(1)}$ – амплитуда первой гармоники выпрямленного напряжения; $U_{dm}^{(1)} = \frac{2}{3}U_0$. Отсюда коэффициент пульсации выходного напряжения определяется в виде

$$k_{\text{п}} = \frac{U_m^{(1)}}{U_0} \approx \frac{I_{\text{L}m}^{(1)}}{2\omega C U_0} = \frac{U_{dm}^{(1)}}{U_0}\frac{1}{4\omega^2 LC}. \qquad (15)$$

Выражение (15) преобразуется к виду $k_{\text{п}} = k_{\text{п.вх}} / k_{\text{с}}$, где $k_{\text{п.вх}}$ – коэффициент пульсаций напряжения u_d на входе фильтра; $k_{\text{п.вх}} = U_{dm}^{(1)} / U_0$; $k_{\text{с}}$ – коэффициент сглаживания индуктивно-емкостного фильтра; $k_{\text{с}} = 4\omega^2 LC$.

В зависимости от значения тока нагрузки выпрямитель может находиться в режиме прерывистого или в режиме непрерывного тока. В прерывистом режиме ток в каждом из диодов протекает в течение интервала τ, который меньше половины периода $T/2$ колебаний напряжения питающей сети.

Переход от первого режима ко второму происходит при превышении тока нагрузки некоторого критического значения $I_0^{'}$. Критическое значение тока нагрузки можно оценить из условия $I_0^{'} = \bar{I}_m^{(1)}$.

Внешняя характеристика двухфазного однотактного выпрямителя. Тип фильтра существенно влияет на вид графика внешней характеристики выпрямителя (рис. 1.9).

Случаю отсутствия фильтра соответствует график 1, а случаям наличия индуктивного, ёмкостного и индуктивно-ёмкостного фильтров - графики 2, 3 и 4 соответственно.

В случаях графиков 1 и 2 выходные напряжения в режиме холостого хода (когда $I_0 = 0$) определяется выражением $U_0 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}U \approx 0{,}9U$, а в случаях графиков 3 и 4 - $U_0 = 2\sqrt{2}\cdot U$.

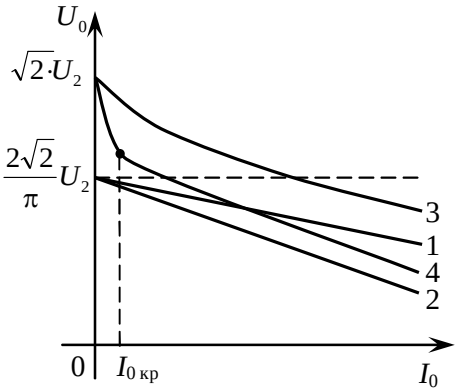

Рис. 1.9

Последнее объясняется тем, что при холостом ходе, когда $R \to \infty$, конденсатор С заряжается в течение интервалов времени τ, когда диод открыт, но разряда конденсатора не происходит. Поэтому напряжение $u_C(t) = u(t)$ постоянно увеличивается, стремясь к амплитуде ЭДС половины вторичной обмотки трансформатора, равной $\sqrt{2} \cdot U_2$. Уменьшение напряжения U_0 с увеличением тока I_0 объясняется ростом падения напряжения на активных сопротивлениях обмоток трансформатора, дросселя фильтра и на диодах.

В случае графика 3 спад графика внешней характеристики по мере роста I_0 происходит более резко, чем при отсутствии фильтра или при индуктивном фильтре. Это объясняется тем, что на значение напряжения U_0 влияет не только падение напряжения на сопротивлении обмоток трансформатора и диодах, но и процессы заряда и разряда конденсатора, в частности более быстрое уменьшение мгновенного значения напряжения $u_C(t) = u(t)$ при разряде на меньшее сопротивление нагрузки *R*.

Особенностью случая графика 4 является наличие быстро спадающего начального участка графика, соответствующего режиму прерывистого тока дросселя ($I_0 < I_{0\,кр}$). При одинаковой ёмкости фильтра этот спад графика внешней характеристики в данной схеме происходит более резко, чем при ёмкостном фильтре. Это связано с тем, что в режиме прерывистого тока дросселя падение напряжения на индуктивности L, возрастающее с увеличением тока I_0, вызывает дополнительное снижение среднего значения выходного напряжения U_0.

В режиме непрерывного тока дросселя фильтра ($I_0 > I_{0\,кр}$) индуктивность L уже не влияет на среднее значение выходного напряжения U_0 и спад графика внешней характеристики является более пологим (кривая 4 приближается к кривой 2). Более крутой, чем при активной нагрузке, спад внешней характеристики при LC-фильтре объясняется наличием активного сопротивления обмотки дросселя фильтра.

Однофазный двухтактный выпрямитель с индуктивным фильтром. В схеме выпрямителя (рис. 1.10) и диаграммах напряжений и токов (рис. 1.11) показано, что в интервале времени, когда $u_2 > 0$, диоды VD2 и VD3 открыты и выпрямленное напряжение $u_d = u_2 - \left(u_{VD1}^{(+)} + u_{VD2}^{(+)}\right)$. К закрытым диодам VD1 и VD4 через открытые диоды VD2 и VD3 приложено обратное напряжение

$$u_{VD1}^{(+)} = u_{VD4}^{(-)} = -\left(u_2 - u_{VD3}^{(+)}\right) \approx u_{VD4}^{(-)} = -\left(u_2 - u_{VD2}^{(+)}\right).$$

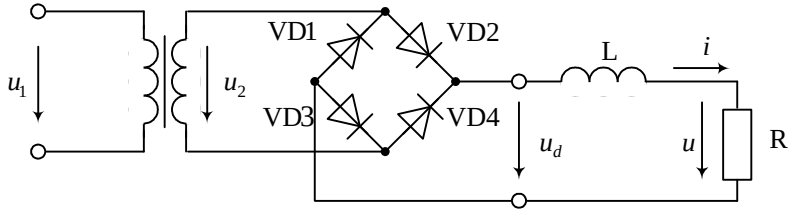

Рис. 1.10

В интервалах времени, когда $u_2 < 0$, открыты диоды VD1 и VD4. Тогда $u_d = u_2 - \left(u_{VD1}^{(+)} + u_{VD2}^{(+)}\right)$, и к диодам VD2, VD3 приложено обратное напряжение

$$u_{VD2}^{(-)} = -\left(u_2 - u_{VD4}^{(+)}\right) \approx u_{VD3}^{(-)} = -\left(u_2 - u_{VD1}^{(+)}\right).$$

Следовательно, отношение наибольшего значения обратного напряжения на диоде к среднему значению выпрямленного напряжения в двухтактной схеме почти в два раза меньше, чем в однотактной.

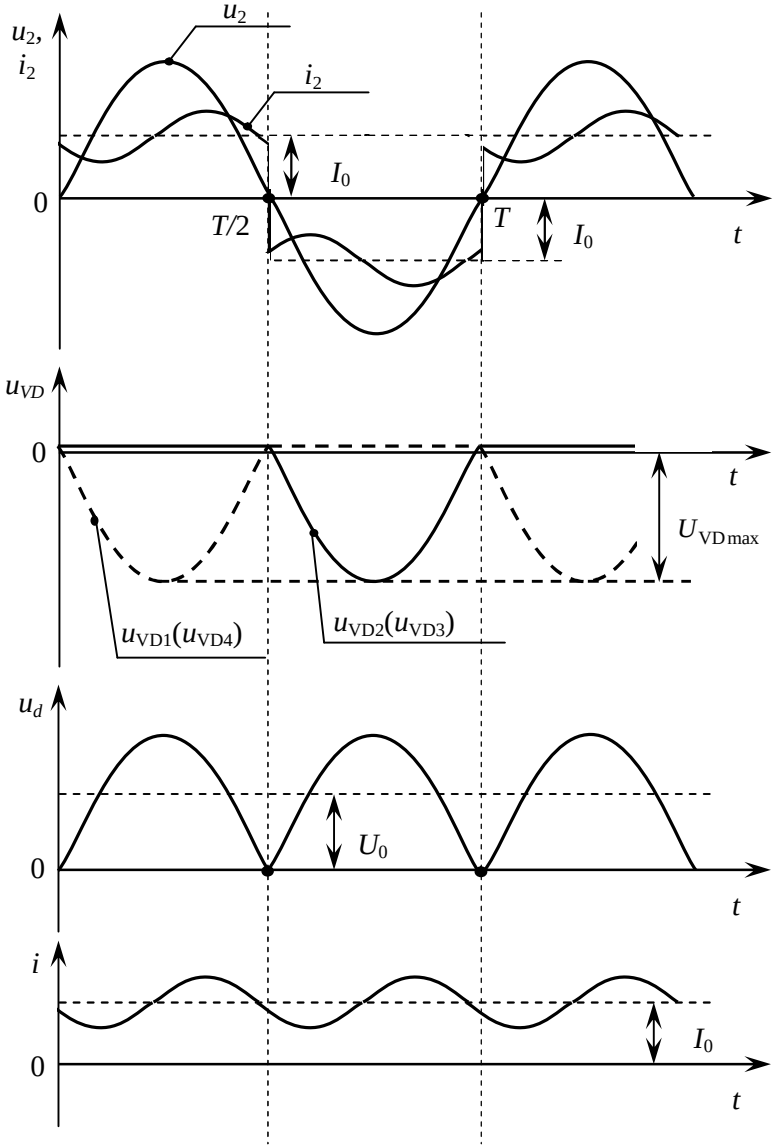
u_2,
i_2
u_2
i_2
I_0
0
$T/2$
T
I_0
t
u_{VD}
0
t
U_{VDmax}
$u_{VD1}(u_{VD4})$
$u_{VD2}(u_{VD3})$
u_d
U_0
0
t
i
I_0
0
t

Рис. 1.11

Среднее значение выпрямленного напряжения определяется по формуле $U_0 \approx U_0 \quad - 2U^{(+)} - Ir$, в которой $U_0 \quad \approx 0,9U$, $U_{\text{VD}}^{(+)}$ - среднее значение прямого напряжения на одном диоде, поэтому КПД меньше, чем в двухфазной однотактной схеме. Соотношения (5) и (6) остаются справедливыми для двухтактной схемы с идеальными диодами.

В этой схеме трансформатор имеет меньшую типовую мощность и габариты, чем в двухфазной однотактной схеме выпрямления.

Недостатком двухтактной схемы по сравнению с однотактной является большее число диодов и большие значения потерь напряжения и мощности на них.

Двухтактный выпрямитель с конденсаторным (индуктивно-конденсаторным) фильтром. Электрические процессы в фильтре и нагрузке аналогичны процессам в однотактной схеме. Параметры выпрямителя в этом случае можно оценить по формулам (10 -15).

1.2. Описание лабораторного стенда

Элементы схем выпрямителей изображены на лицевой панели лабораторной установки. Трансформатор обеспечивает снижение уровня напряжении электрической сети переменного тока для подачи на вход диодной схемы выпрямителя. Дроссель и конденсатор предназначены для сборки схем сглаживающих фильтров.

Измерительные приборы служат для измерения тока и напряжения нагрузки выпрямителя. Измерительные шунты сопротивлением 1 Ом предназначены для наблюдения осциллограмм тока в отдельных элементах электрической цепи выпрямителя.

Для построения выпрямителя требуемого вида необходимо выполнить дополнительные соединения между элементами схемы.

1.3. Расчетное задание

1. При указанных на лицевой панели лабораторной установки значениях параметров элементов схемы и $R = 70$ Ом, r_{T} = 7 Ом, рассчитать коэффициент пульсаций на выходе двухфазного выпрямителя при работе: а) без фильтра; б) с индуктивным фильт-

ром; в) с емкостным фильтром; г) с LC-фильтром. Для этого воспользоваться формулами (6), (13), (15), в формуле (13) принять cosθ = 0,67. В LC-фильтре использовать дроссель с меньшей индуктивностью и конденсатор с большей емкостью.

2. По формуле (14) рассчитать критическое значение тока нагрузки для выпрямителя с индуктивно-емкостным фильтром.

1.4. Рабочее задание

Выполнить экспериментальные исследования по следующей программе:

1. Собрать исследуемую схему выпрямителя.

2. Меняя сопротивление нагрузки, получить экспериментальные данные внешней характеристики (зависимость U_0 от I_0) и построить график этой функции.

3. В режиме максимального тока нагрузки зарисовать осциллограммы: тока во вторичной обмотке трансформатора i_2, напряжения на половине вторичной обмотки трансформатора u_{22}, на нагрузке u, на диоде u_{VD2}.

4. По осциллограмме выходного напряжения выпрямителя определить коэффициент пульсации выходного напряжения в двух указанных преподавателем режимах работы. Сравнить полученные экспериментально и расчетным путем значения коэффициента пульсации.

При определении коэффициента пульсации $k_п$ необходимо по осциллограмме напряжения U определить амплитуду переменной составляющей $U_{\sim m}$ и разделить её на измеренное среднее значение напряжения U_0.

5. Для схем с индуктивно-емкостным фильтром экспериментально найти критический ток нагрузки.

Критический режим работы выпрямителя с Г-образным LC-фильтром устанавливается по форме кривой тока дросселя фильтра i_L при плавном изменении среднего значения тока нагрузки i. При уменьшении тока i форма переменной составляю-

щей тока i_L сначала не меняется, а при $i < i_{кр}$ в осциллограмме тока i_L появляются интервалы времени, в которых $i_L = 0$.

6. Провести анализ полученных результатов.

1.5. Контрольные вопросы

1. По каким признакам и как классифицируют схемы выпрямителей?
2. Каковы особенности работы двухфазного однотактного выпрямителя на индуктивную нагрузку?
3. Каковы особенности работы двухфазного однотактного выпрямителя на активно-емкостную нагрузку?
4. Каковы особенности работы двухфазного однотактного выпрямителя с индуктивно-емкостным фильтром?
5. Как влияет тип фильтра на внешнюю характеристику выпрямителя?
6. Каковы особенности работы однофазного двухтактного выпрямителя на индуктивную нагрузку?
7. Как влияет тип фильтра на длительность импульсов тока в диодах выпрямителя?
8. В каких случаях эффективно применение индуктивного фильтра?
9. Чем объясняется различие значений отношения $\frac{U_{VD\max}}{U_0}$ в однотактной и двухтактной схемах выпрямления?
10. Как определяется КПД выпрямителя?