В общем случае при M однополярных импульсах на полупериоде кривой выходного напряжения амплитуду n-й гармоники можно найти из выражения

$$U_{\text{н}(n)\max} = \frac{8E_d}{n\pi} \sin\left(n\frac{\lambda}{2}\right) \sum_{k=1}^{M/2} \sin(n\beta_k), \qquad (12.20)$$

где $k = 1, 2, 3, 4\ldots$

Приравнивая к нулю выражение, стоящее под знаком суммы, находят углы β, соответствующие центрам составляющих импульсов, при которых исключаются наиболее весомые гармоники. Число исключенных гармоник пропорционально числу импульсов, находящихся на четверти периода выходного напряжения. Так, при четырех импульсах на полупериоде (кривая на рис. 12.28) и $\beta_1 = 42°$, $\beta_2 = 78°$ исключаются третья и пятая гармоники. Причем изменяя ширину импульсов и оставляя неизменными углы центров импульсов, можно регулировать действующее значение выходного напряжения при отсутствии исключенных гармоник во всем диапазоне регулирования. Это существенно, так как выходные фильтры рассчитываются на подавление наиболее весомой (после основной) гармоники.

12.5. Трехфазные АИН

Практически трехфазные АИН могут быть реализованы двумя способами:

1) путем использования однофазных мостовых схем с трансформаторным выходом, работающих на общую нагрузку, с фазовым сдвигом на электрический угол 120° (рис. 12.30).

2) с помощью трехфазной мостовой схемы, построенной на базе трех полумостовых схем (рис. 12.31).

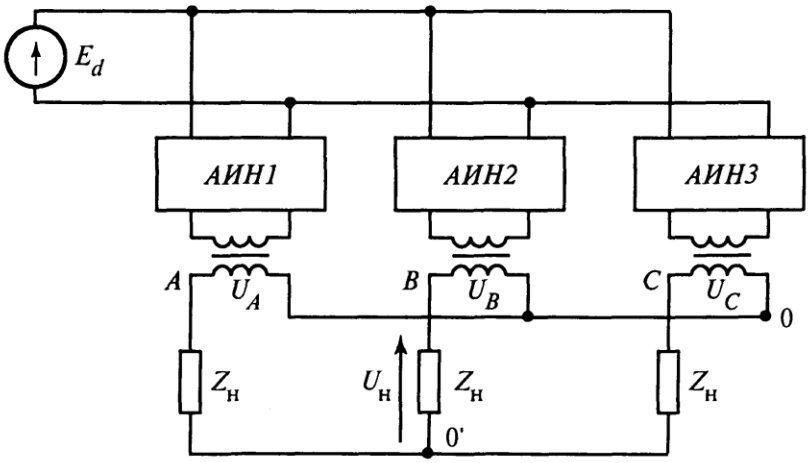


Рис. 12.30

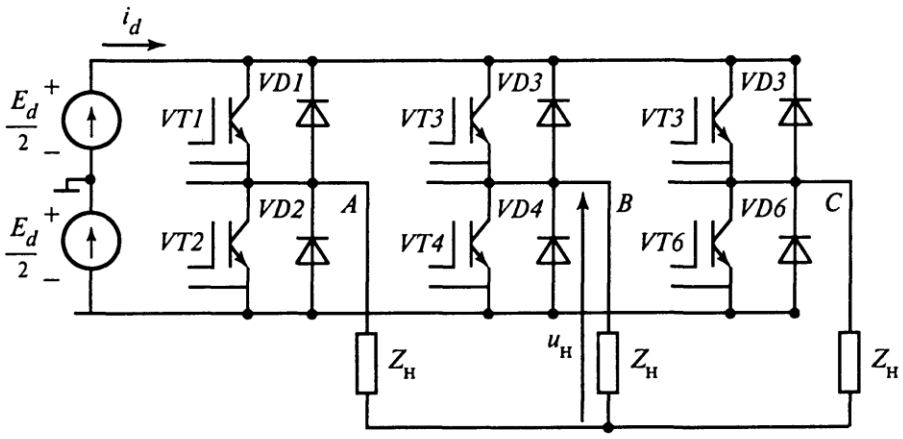


Рис. 12.31

В схеме рис. 12.30 нагрузку можно включать как в звезду, так и в треугольник. Эта схема позволяет осуществлять пофазное регулирование выходного напряжения внутренними средствами, используя ШИР, ШИМ, а также и выборочное исключение гармоник из кривой выходного напряжения. Недостаток такого способа реализации трехфазных АИН — обязательное наличие выходного трансформатора и удвоенное число вентильных комплектов по сравнению с обычной трехфазной схемой.

При реализации трехфазной схемы АИН на базе трех полумостовых схем инвертор может работать как с трансформатором, так и без него. Кривая выходного напряжения может формироваться с использованием ШИМ, ШИР и выборочным исключением гармоник.

Рассмотрим несколько подробнее формирование кривой напряжения на нагрузке для схемы рис. 12.31.

Для простоты изучим режим работы АИН, когда вентили полумоста подключают каждую фазу нагрузки к источнику питания E_d на интервале π. Как следует из алгоритма переключения вентилей (рис. 12.32, *а—е*) в схеме рис. 12.31, в любой момент времени одна из фаз нагрузки подключена к одному из полюсов источника питания, а две другие — к другому (рис. 12.33, *а*, *б*).

Тогда к нагрузке той одиночной фазы, которая подключена к одному из полюсов источника питания, прикладывается напряжение

$$u_н' = \pm E_d \frac{Z_н}{Z_н + \frac{Z_н Z_н}{Z_н + Z_н}} = \pm \frac{2}{3} E_d. \qquad (12.21)$$

В то же время две вторые фазы оказываются включенными параллельно и подключенными к другому полюсу источника питания и к ним прикладывается напряжение:

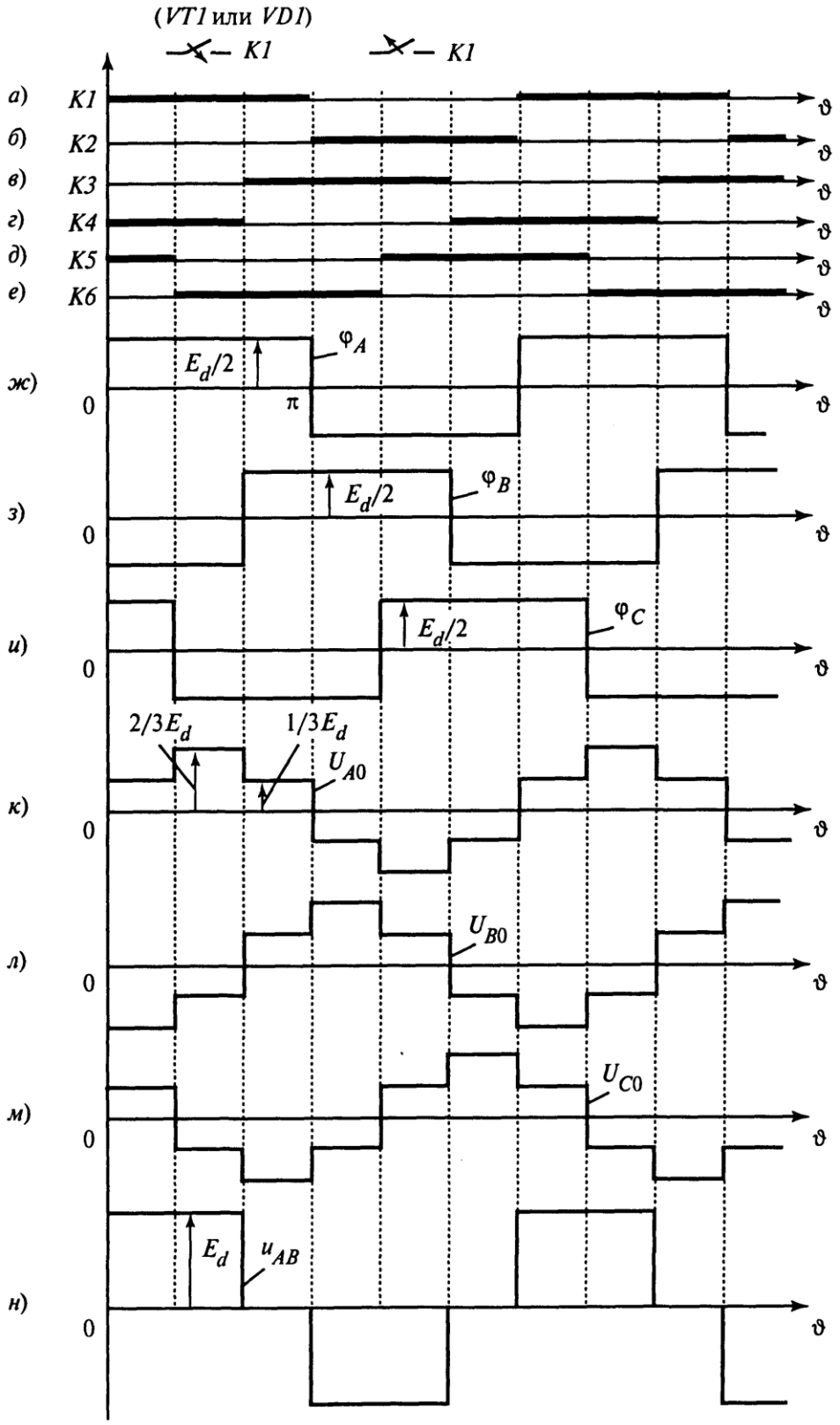

(VT1 или VD1)
K1
K1
а)
K1
б)
K2
в)
K3
г)
K4
д)
K5
е)
K6
ж)
$E_d/2$
φ_A
π
з)
$E_d/2$
φ_B
и)
$E_d/2$
φ_C
к)
$2/3E_d$
$1/3E_d$
U_{A0}
л)
U_{B0}
м)
U_{C0}
н)
E_d
u_{AB}
0
ϑ

Рис. 12.32

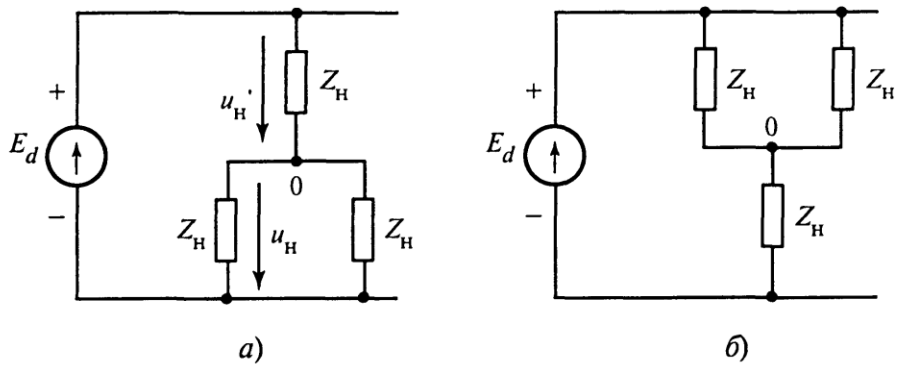


Рис. 12.33

$$u_н = \pm E_d \frac{\dfrac{Z_н Z_н}{Z_н + Z_н}}{Z_н + \dfrac{Z_н Z_н}{Z_н + Z_н}} = \pm \frac{1}{3} E_d. \qquad (12.22)$$

С учетом вышеизложенного на рис. 12.32, *к—м* построены кривые фазного напряжении на нагрузке. На рис. 12.32, *н* построена кривая одной из фаз выходного линейного напряжения инвертора

$$u_{AB} = \varphi_A - \varphi_B.$$

В заключение необходимо отметить, что в спектре выходного напряжения отсутствуют четные гармоники, гармоники, кратные трем, а также те гармоники, которые исключаются при селективном методе исключения гармоник. Однако при таком способе формирования кривой выходного напряжения невозможно осуществлять пофазное регулирование выходного напряжения, которое необходимо при изменяемой несимметричной нагрузке. В этом случае можно использовать схему силового блока рис. 12.29.

Контрольные вопросы и задачи

12.1. Какие требования предъявляются к переключающим элементам автономных инверторов?

12.2. Для чего служат обратные диоды в схемах АИН?

12.3. При каких условиях и как осуществляется энергообмен между нагрузкой и источником питания?

12.4. При каком условии при расчете токов ключевых элементов АИН можно использовать метод основной гармоники?

12.5. Задача: однофазный АИН собран по схеме рис. 12.2. E_d = 100 В, $R_н$ = = 10 Ом, $L_н$ = 0,064 Гн, $f_н$ = 50 Гц. Определить максимальное значение тока нагрузки $I_{н\,max}$.

12.6. *Задача*: однофазный АИН собран по схеме рис. 12.2. Используя метод основной гармоники (считая, что потребляемый от инвертора ток имеет

Среднее значение тока тиристора

$$I_{\text{т.ср}}=\frac{1}{T}\int_{t_1}^{T/2} i\,dt=\frac{E_d}{R}\left(\frac{T}{2}-t_1\right)\frac{1}{T}+\left(-I_{\text{макс}}-\frac{E_d}{R}\right)-$$

$$-\frac{\tau}{T}\left(e^{-T/2}-e^{-t_1/\tau}\right)=\frac{10}{0,4}\left(\frac{10\cdot10^{-3}}{2}-1,24\cdot10^{-3}\right)\frac{1}{10\cdot10^{-3}}+$$

$$+\left(-16-\frac{10}{0,4}\right)\left(\frac{-2,5\cdot10^{-3}}{10\cdot10^{-3}}\right)\left(e^{-10/(2\cdot2,5)}-e^{-1,24/2,5}\right)=4,551\ \text{А}.$$

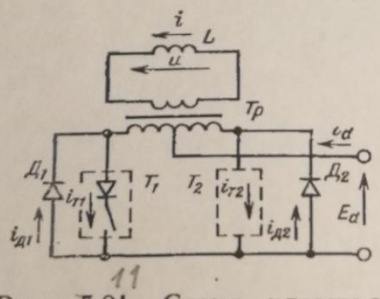


Рис. 5.21. Схема идеального однофазного инвертора (задача 5.4).

Задача 5.4. В схеме идеального однофазного инвертора, представленной на рис. 5.21, тиристоры заменены диодами и ключами, соединенными последовательно. Инвертор питает чисто индуктивную нагрузку через трансформатор. Построить кривые токов i_d, i, $i_{д1}$, $i_{д2}$, $i_{т1}$, $i_{т2}$ и напряжения u и найти средние значения токов диодов и тиристоров, если $E_d=10$ В, $L=1$ мГн, $f=100$ Гц. Трансформатор идеальный, его коэффициент трансформации, отнесенный к одной полуобмотке, равен 1 : 1.

Решение. Подобно тому как это было в задаче 5.1, напряжение u на нагрузке будет периодическим с прямоугольной формой кривой (рис. 5.22,*а*). Следовательно, кривая тока i будет такой же, как и в задаче 5.1. Так как исходные данные в общих задачах одинаковые, то будут совпадать и численные значения.

Средние значения токов:

$$I_{\text{д.ср}}=I_{\text{т.ср}}=3,125\ \text{А};$$

$$I_{\text{ср}}=0.$$

Задача 5.5. В идеализированной схеме однофазного инвертора, показанной на рис. 5.23, тиристоры заменены ключами и диодами, соединенными последовательно. Нагрузка состоит из индуктивности L. Построить кривые токов i_{d1}, i_{d2}, i, $i_{д1}$, $i_{д2}$, $i_{т1}$, $i_{т2}$ и напряжения u и вычислить средние значе-

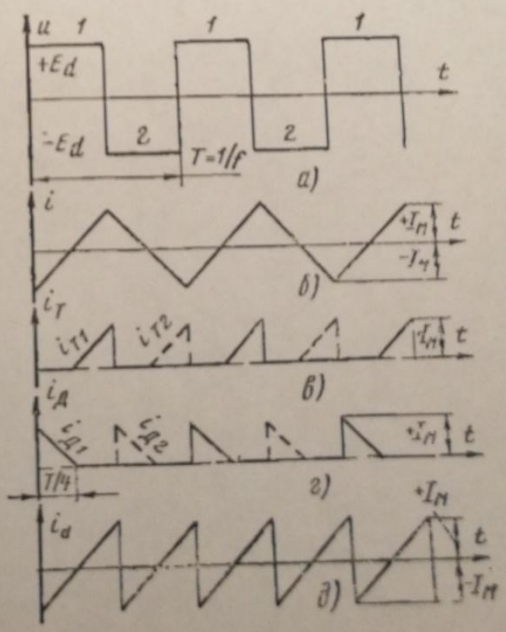


Рис. 5.22. Диаграммы характерных величин в схеме на рис. 5.21.

ния токов тиристоров и диодов, если E_d=10 В, L=1 мГн, f=100 Гц.

Решение. Задача может быть легко решена с использованием результатов предыдущих задач. Кривые те же, что и на рис. 5.22, за исключением кривых токов источников питания, которые показаны на рис. 5.24. Численные результаты также одинаковы.

Задача 5.6. В схеме идеального трехфазного инвертора, показанной на рис. 5.25, тиристоры заменены диодами и ключами, соединенными последовательно. Построить кривые фазных напряжений на нагрузке, токов вентилей и источника питания и вычислить средние значения токов вентилей, если E_d=10 В, f=100 Гц и а) нагрузка чисто активная, R_1=R_2=R_3=R=1 Ом, б) нагрузка чисто индуктивная, L_1=L_2=L_3=L=1 мГн. Каждый ключ включается на один полупериод.

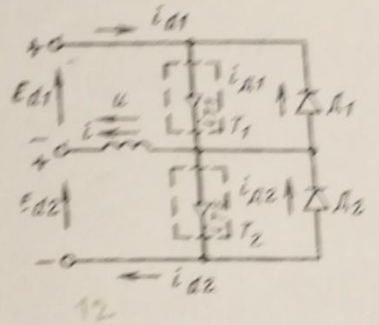


Рис. 5.23. Схема идеального однофазного инвертора с двумя источниками питания (задача 5.5).

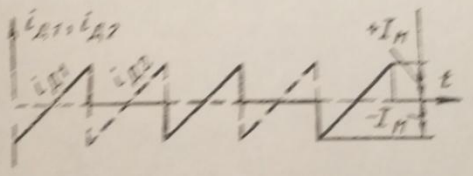


Рис. 5.24. Диаграммы токов источников питания в схеме на рис. 5.23.

Решение. Заменим источник питания с ЭДС E_d двумя последовательно соединенными источниками с ЭДС $E_d/2$ каждый. Обозначим напряжения на стороне переменного тока относительно нейтрали источника питания через u_{1n}, u_{2n}, u_{3n}, $u_{0'0}$. Благодаря наличию обратных диодов, соединенных встречно-параллельно с тиристорами, состояния тиристоров однозначно определяют потенциалы точек *1, 2, 3* (рис. 5.26,*д, б, в*). Фазные напряжения получаем из уравнений

$$u_1 = u_{10} - u_{0'0}.$$

Предполагая, что нагрузка состоит только из активных сопротивлений, получаем:

$$u_1 = Ri_1;\ u_2 = Ri_2;\ u_3 = Ri_3,$$

т. е.

$$u_1 + u_2 + u_3 = u_{10} + u_{20} + u_{30} - 3u_{0'0} = R(i_1 + i_2 + i_3).$$

Поскольку

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0,$$

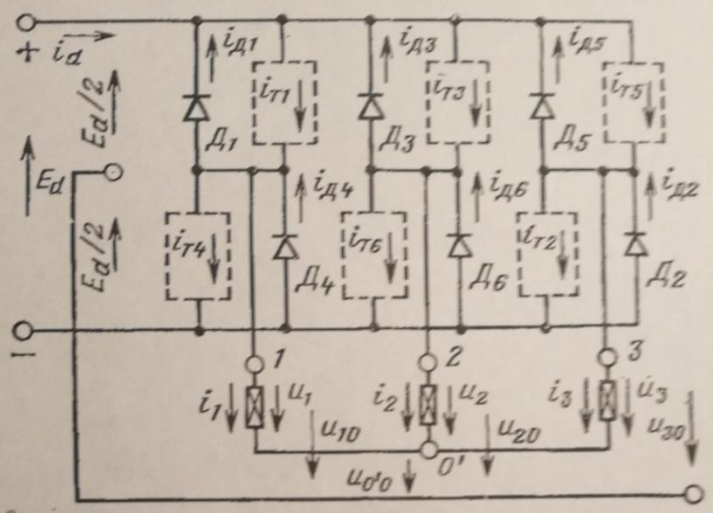
то

$$u_{0'0} = \frac{1}{3}(u_{10} + u_{20} + u_{30}).$$

Напряжение нулевой точки звезды относительно нейтрали на стороне постоянного тока показано на рис. 5.26,*г*. Фазные напряжения показаны пунктирными линиями на рис. 5.26,*д, б, в*.

Кривые токов, протекающих через активные сопротивления, совпадают по форме с кривыми фазных напряжений u_1, u_2, u_3. На рис. 5.26,*д—ж* показаны кривые токов, протекающих через тиристоры T_1, T_3 и T_5. Здесь обозначено $I=E_d/2R$. Ток источника питания (рис. 5.26,*з*) может быть определен из уравнения

$$i_d=i_{T1}+i_{T3}+i_{T5}.$$



13

Рис. 5.25. Схема идеального трехфазного инвертора (задача 5.6).

Решение этого уравнения дает следующий результат:

$$I_d=\frac{4}{3}I=\frac{4}{3}\frac{10}{2}=6{,}666\ \text{А}.$$

Среднее значение тока тиристора

$$I_{\text{т.ср}}=\frac{1}{T}\left(2\frac{T}{6}\frac{2}{3}I+\frac{T}{6}\frac{4}{3}I\right)=\frac{4}{9}I=\frac{4}{9}\frac{E_d}{2R}=$$

$$=\frac{4}{9}\frac{10}{2{,}1}=2{,}222\ \text{А}.$$

Отсюда видно, что

$$I_{\text{т.ср}}=\frac{I_d}{3}.$$

При чисто индуктивной нагрузке фазные напряжения определяются аналогично. Кривые фазных напряжений совпадают с кривыми фазных напряжений при активной нагрузке (рис. 5.27,*д—в*). Фазные токи представляют собой кусочно-линейную функцию, состоящую из отрезков прямых с периодически меняющимся накло-

ном:

$$\frac{di_{1,3,5}}{dt} = \pm\frac{1}{3}\frac{E_d}{L} \text{ и } \frac{di_{1,3,5}}{dt} = \pm\frac{2}{3}\frac{E_d}{L}.$$

Так как фазные напряжения симметричные, фазные токи тоже будут симметричными. Из рис. 5.27,*г* следует:

$$I_1 = \frac{2}{3}\frac{T}{12}\frac{E_d}{L} = \frac{2\cdot 10\cdot 10^{-3}}{12}\frac{1}{3}\frac{10}{1\cdot 10^{-3}} = 5{,}555 \text{ А};$$

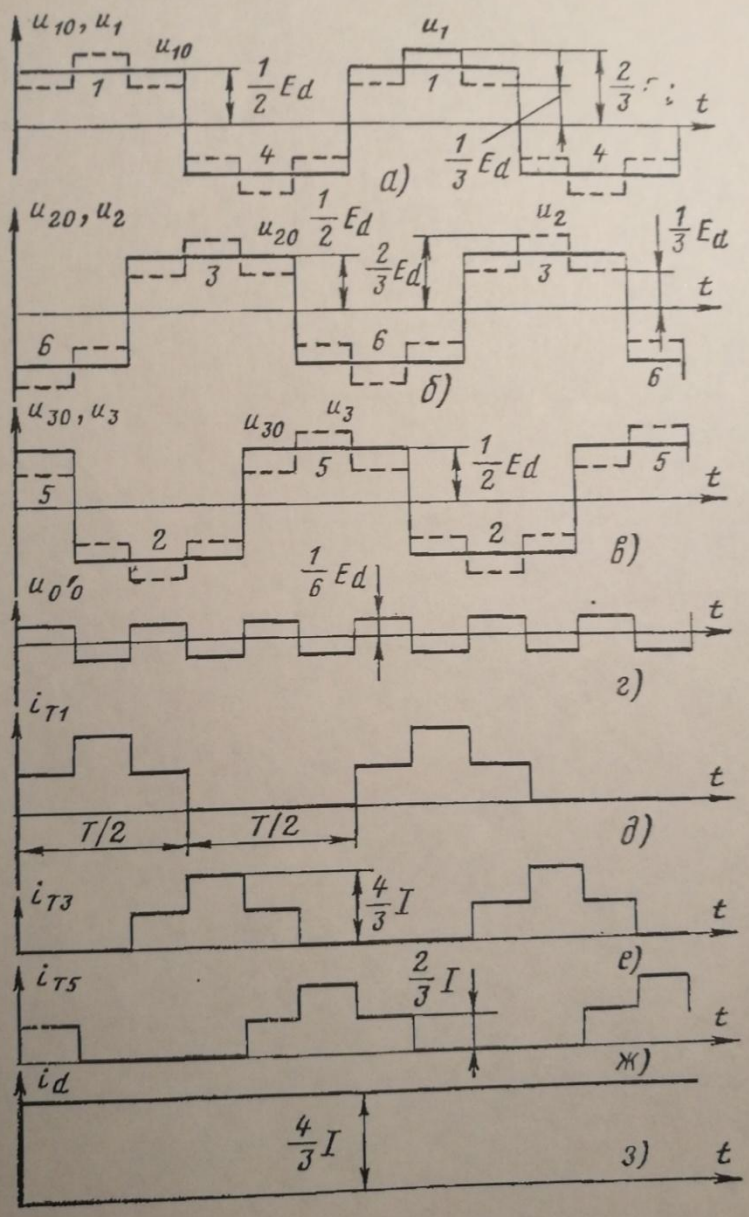


Рис. 5.26. Диаграммы характерных величин в схеме на рис. 5.25 при активной нагрузке.

$$I_{\text{макс}} = I_1 + \frac{1}{3}\,\frac{T}{6}\,\frac{E_d}{L} = 2I_1 = 11{,}110\ \text{А}.$$

Тиристоры и обратные диоды проводят ток попеременно (рис. 5.27,*д*, *е*). Средние значения токов, протекающих через отдельные элементы, будут:

$$I_{\text{т.ср}} = I_{\text{д.ср}} = \frac{1}{T}\left[\frac{1}{2}\,I_1\,\frac{T}{12} + \frac{1}{2}\,(I_1 + I_{\text{макс}})\right] =$$

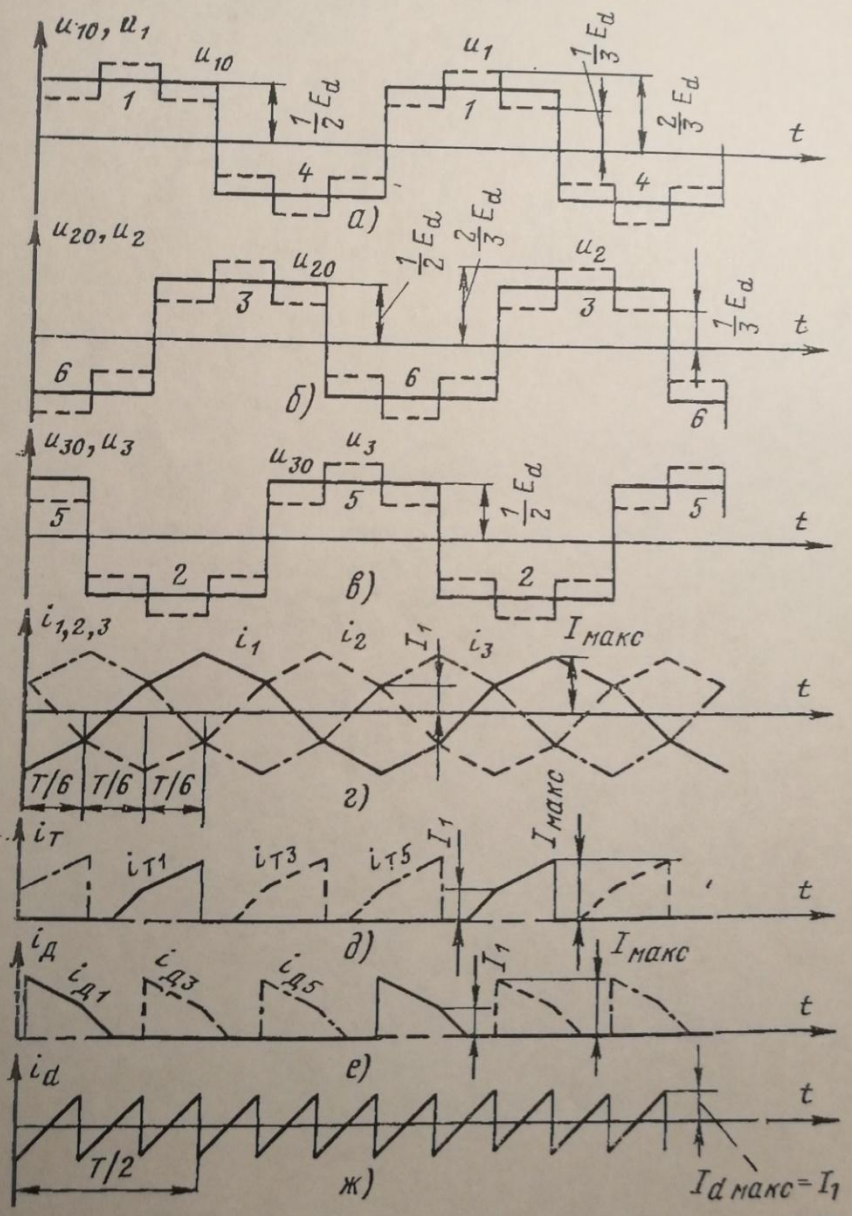


Рис. 5.27. Диаграммы характерных величин в схеме на рис. 5.25 при индуктивной нагрузке.

$$=\frac{7}{24} I_1 = 1{,}622 \text{ А}.$$

Ток i_d, потребляемый от источника постоянного тока, равен:

$$i_d = i_{т1} + i_{т3} + i_{т5} - (i_{д1} + i_{д3} + i_{д5})$$

(рис. 5.27,*ж*). Среднее значение этого тока равно нулю.

Задача 5.7. Выводы двух одинаковых однофазных инверторов соединены последовательно с целью регулирования напряжения

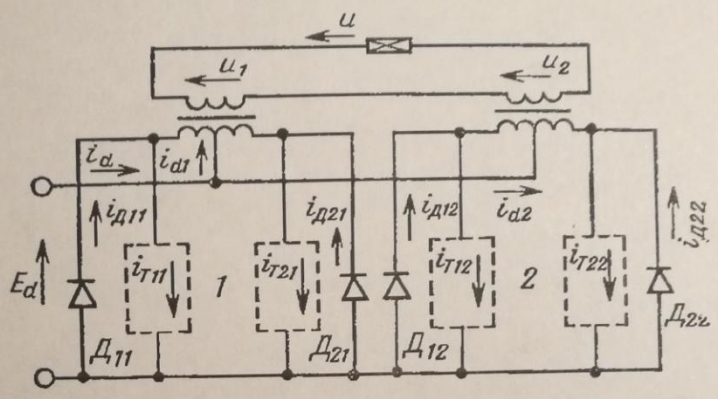


Рис. 5.28. Схема двух идеальных однофазных последовательно соединенных инверторов.

(рис. 5.28). Требуется исследовать условия работы схемы, если отдельные инверторы управляются так, что их выходные напряжения сдвинуты на 90 градусов одно относительно другого. Построить кривые напряжений u, u_1 и u_2 и токов $i_д$, $i_т$, i_d, i_{d2} и i_d и найти средние значения токов, если $E_d=10$ В, $f=100$ Гц, а) нагрузка $R=1$ Ом, б) нагрузка $L=1$ мГн.

Коэффициент трансформации, отнесенный к одной полуобмотке, равен 1 : 1. Вентили и трансформатор идеальные.

Решение. В данном случае оба напряжения u_1 и u_2 представляют собой периодические напряжения с прямоугольной формой кривой и амплитудой E_d, не зависящей от нагрузки (рис. 5.29,*а*, *б*). Напряжение на нагрузке $u=u_1+u_2$ (рис. 5.29,*в*).

а) При чисто активной нагрузке тиристоры проводят попеременно ток, форма кривой которого совпадает с формой кривой напряжения (рис. 5.29).

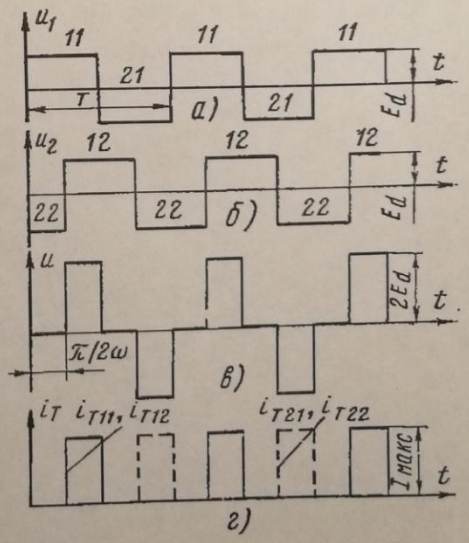


Рис. 5.29. Диаграммы характерных величин в схеме на рис. 5.28 при активной нагрузке.