

ЛЕКЦИЯ 3

14.1. Автономные резонансные инверторы без обратных диодов

Автономные резонансные инверторы используются для получения на нагрузке переменного напряжения повышенной частоты (400 Гц — 10 кГц и выше). Такие инверторы широко применяются в электротермии, в системах индукционного нагрева, закалки, плавки металлов и др. Процессы, протекающие в АРИ, характеризуются колебательным перезарядом в цепи с индуктивностью нагрузки или дополнительно включенной катушкой индуктивности и специально включенным конденсатором, которые образуют колебательный контур.

Различают два типа АРИ:

- 1) резонансные инверторы без обратных диодов;
- 2) резонансные инверторы с обратными диодами.

Однофазная схема такого автономного инвертора без обратных диодов показана на рис. 14.1. В приведенной схеме в качестве ключевых элементов используются одноперационные тиристоры.

Кривая тока нагрузки $i_H(t)$ формируется путем попарного открывания диагонально включенных тириستоров. Изменение тока во времени $i_H(t)$ в последовательно с колебательным контуром включенной нагрузке обуславливается колебательным процессом перезаряда конденсатора C_K .

Временные диаграммы изменения токов и напряжений на различных участках схемы в установившемся режиме показаны

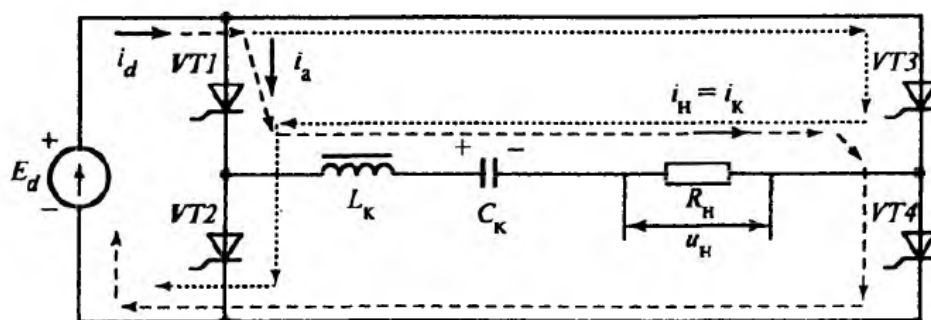


Рис. 14.1

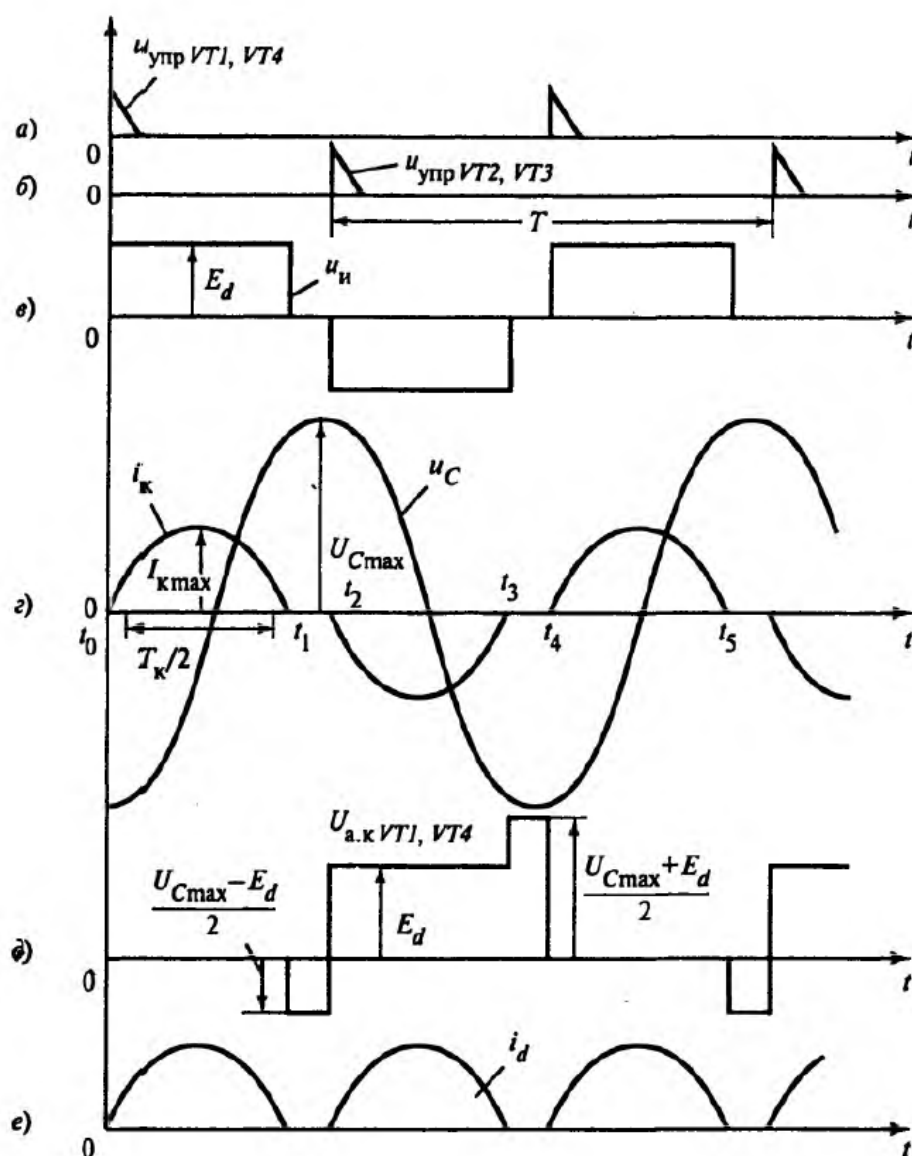


Рис. 14.2

на рис. 14.2. При подаче импульсов управления на управляющие электроды силовых ключей (рис. 14.2, а, б) (например, на тиристоры $VT1$ и $VT4$ в момент времени t_0 , рис. 14.2, а) напряжение источника питания E_d прикладывается к колебательному контуру (рис. 14.2, в). Ток $i_n = i_k$ (рис. 14.2, г) и имеющий колебательный характер, течет по цепи $(+E_d) - L_k - C_k - R_n - (-E_d)$.

Эквивалентная схема замещения электрической цепи на интервале открытого состояния ключей $VT1$, $VT4$ показана на рис. 14.3.

Знаки напряжения на конденсаторе в начале каждого цикла перезаряда конденсатора $U_C(0)$ соответствуют полярности, которую приобрел конденсатор от предыдущего цикла, когда ток проводили тиристоры $VT2$ и $VT3$. На начальном этапе цикла конденсатор начнет разряжаться, а затем заряжаться до некоторого значения емкости с противоположной полярностью.

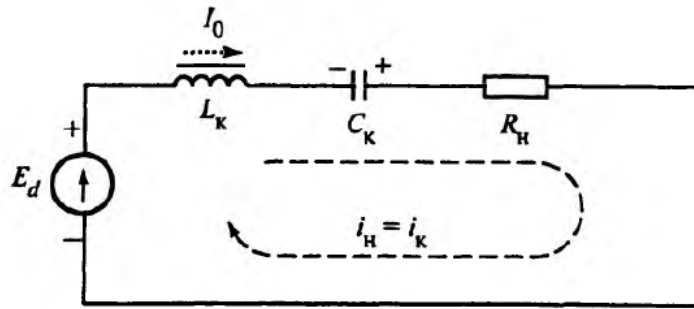


Рис. 14.3

Дифференциальное уравнение цепи при подключении контура к источнику питания E_d при условии, что ток в контуре $I_0 = 0$ в момент подключения контура к E_d , имеет вид:

$$E_d = L_k \frac{di_k}{dt} + \frac{1}{C_k} \int_{t_0}^{t_1} i_k dt - U_C(0) + R_n i_k. \quad (14.1)$$

Изображение по Лапласу этого уравнения записывается в виде

$$\frac{E_d + U_C(0)}{p} = L_k p I_k(p) + \frac{1}{p C_k} I_k(p) + R_n I_k(p). \quad (14.2)$$

Решаем уравнение относительно $I_k(p)$:

$$I_k(p) = \frac{\frac{E_d + U_C(0)}{L_k}}{p^2 + \frac{R_n}{L_k} p + \frac{1}{L_k C_k}}. \quad (14.3)$$

Для колебательного процесса [при $R_n < 2X$ (где $X = \sqrt{L_k/C_k}$ — характеристическое сопротивление контура и $\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{L_k C_k}$ — собственная частота колебательного контура)] изображение по Лапласу имеет вид:

$$i_k = \frac{E_d + U_C(0)}{X} e^{-\frac{R_n}{2L_k} t} \sin(\omega_0 t) = I_{k \max} e^{-\frac{R_n}{2L_k} t} \sin(\omega_0 t), \quad (14.4)$$

где $I_{k \max} = \frac{E_d + U_C(0)}{X}.$

Зависимость изменения напряжения на конденсаторе C_k получается подобным образом. Интегральное уравнение

$$u_C = U_C(0) + \frac{1}{C_k} \int_{t_0}^{t_1} i_k dt$$

имеет изображение по Лапласу

$$U_C(p) = \frac{U_C(0)}{p} + \frac{1}{pC_k} I_k(p),$$

откуда

$$U_C(p) = \frac{U_C(0)}{p} + \frac{\frac{E_d + U_C(0)}{L_k C_k p}}{p^2 + \frac{R}{L_k} p + \frac{1}{L_k C_k}}. \quad (14.5)$$

Обратное преобразование с учетом приведенных выше обозначений и допущений приводит к выражению

$$u_C \approx E_d - [E_d + U_C(0)] \cos(\omega_0 t) e^{-\frac{R}{2L_k} t}. \quad (14.6)$$

Полученное соотношение справедливо для полупериода любого этапа работы схем, но в этом случае в уравнение необходимо подставлять соответствующий временной интервал от нуля до π , а значение $U_C(0)$ соответствует значению напряжения на конденсаторе в конце предыдущего этапа. Кривая изменения напряжения на конденсаторе показана на рис. 14.2, з. Из анализа полученного выражения следует: если $R = 0$ и в момент включения схемы $U_C(0) = 0$, то к концу первого этапа $U_C(\omega t_1) = U_C(\pi) = 2E_d$. И так от этапа к этапу напряжение на конденсаторе будет возрастать, что в конце концов приведет к пробоем вентилей. Такое явление называется процессом накопления энергии. В реальном случае при $R \neq 0$ процесс накопления энергии в конденсаторе остановится на некотором уровне и $U_C(0)$ станет больше E_d . При расчете параметров элементов схемы (R , C_k и L_k) их номиналы выбираются таким образом, чтобы напряжение на конденсаторе было в пределах $(2-3)E_d$.

На рис. 14.2, д построена кривая изменения напряжения на вентиле с учетом того, что напряжение на проводящем вентиле близко к нулю, а к закрытому вентилю того же плеча прикладывается напряжение E_d . На этапе закрытого состояния всех вентилей к ним прикладывается полусумма или полуразность напряжений источника питания и на конденсаторе. Накопление энергии на конденсаторе, а

значит, и напряжения на нем приводит к перенапряжению на ключевых приборах, что может привести к их выходу из строя.

Очевидно, что от источника питания потребляется ток на этапе перезаряда конденсатора (см. рис. 14.2, е).

14.2. Автономные резонансные инверторы с обратными диодами

С целью улучшить энергетические показатели резонансного инвертора в схему силового блока добавляют обратные диоды (рис. 14.4).

Различают два режима работы таких инверторов:

- 1) режим прерывистого тока нагрузки;
- 2) режим непрерывного тока.

На рис. 14.5, а, б показаны кривые импульсов управления силовых ключей инвертора. Особенность процессов, протекающих в схеме, заключается в том, что каждый такт отпираания накрест лежащих управляемых ключей сопровождается формированием двух полу- волн кривой тока нагрузки (рис. 14.5, в). Одна полуволна обусловливается колебательным перезарядом конденсатора под действием напряжения источника питания через открытые тиристоры $VT1$, $VT4$ на интервале от нуля до t_1 .

В результате того, что на первом этапе конденсатор заряжается до напряжения

$$U_C(t_1) = E_d - [E_d + U_C(0)] \cos(\omega_0 t) e^{-\frac{R_H}{2L_K} t_1} > E_d, \quad (14.7)$$

при спаде прямого тока до нуля открываются обратные диоды, включенные параллельно ранее проводившим тиристорам. Ток в нагрузке и в источнике, определяемый соотношением

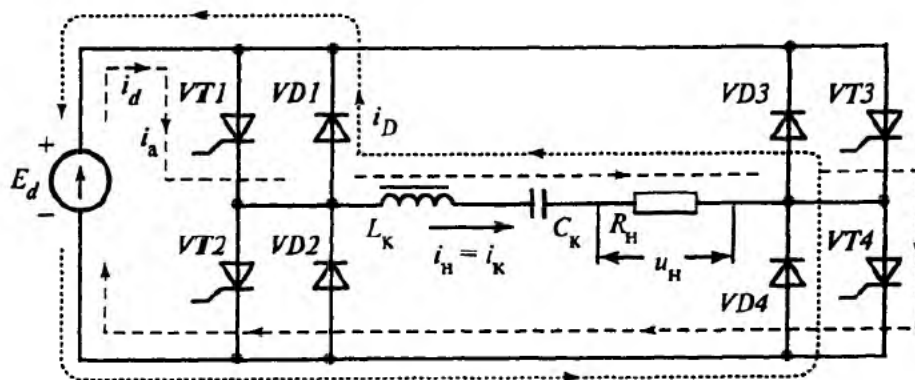


Рис. 14.4

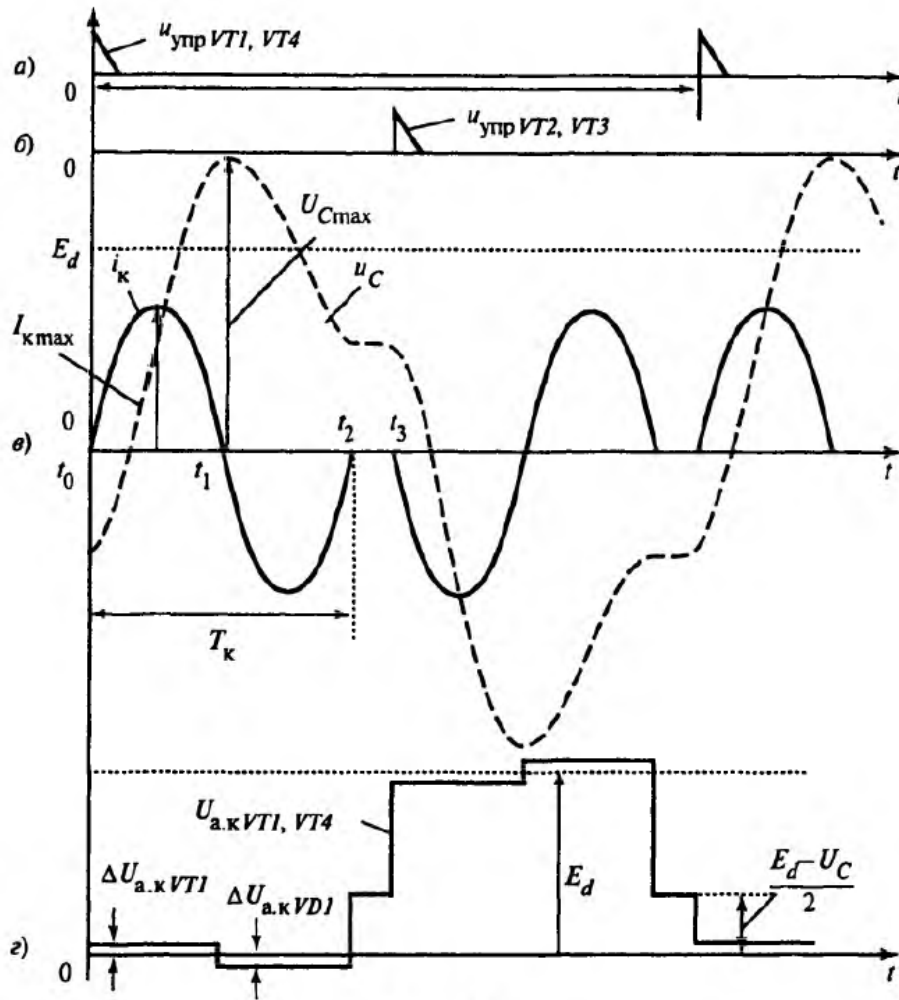


Рис. 14.5

$$i_k(t_1 - t_2) = -\frac{E_d - U_C(t_1)}{X} e^{-\frac{R_H}{2L_K} t} \sin(\omega_0 t), \quad (14.8)$$

изменяет направление, и конденсатор разряжается по закону

$$U_C(t_1 - t_2) = E_d + [-E_d + U_C(0)] \cos(\omega_0 t) e^{-\frac{R_H}{2L_K} t}; \quad (14.9)$$

$$U_C(t_2) = U_C(0) = -E_d + [E_d + U_C(t_1)] e^{-\frac{R_H}{2L_K} t_2}. \quad (14.10)$$

В момент времени t_2 конденсатор разрядится до напряжения $U_C(t_2)$ и на интервале $t_2 - t_3$ напряжение останется постоянным. Далее включатся накрест лежащие управляемые ключи и процесс повторится.

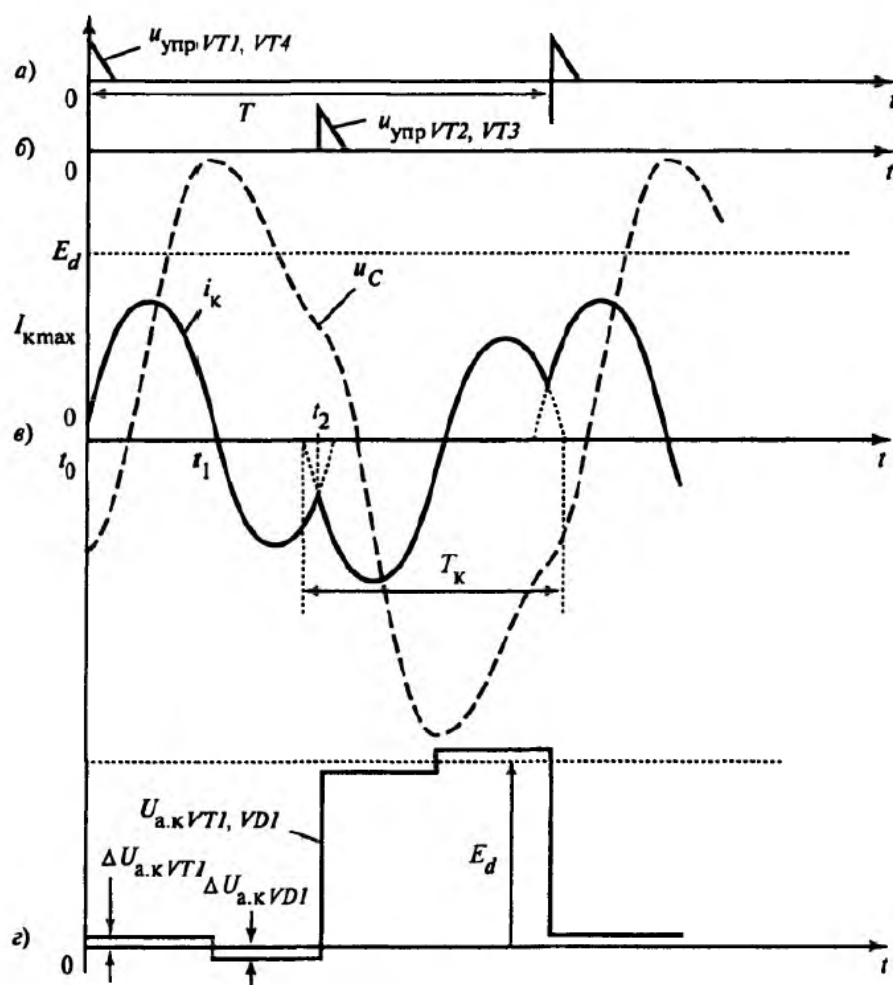


Рис. 14.6

Напряжение на открытых диодах $\Delta U_{a.k VD1}$ с отрицательной полярностью прикладывается к ранее проводившим тиристорам на этапе формирования второй полуволны тока, что создает условия к восстановлению их управляющих свойств (рис. 14.5, з). На интервале токовой паузы к ключевым элементам прикладывается напряжение $(E_d - U_c)/2$, как проиллюстрировано на рис. 14.5, з.

В режиме непрерывного тока нагрузки управляющие импульсы на очередную пару управляемых ключей подаются раньше чем закончится колебательный процесс перезаряда конденсатора через обратные диоды (рис. 14.6). При этом $T_k > T/2$. Очередное отпирание тиристоров происходит до завершения перезаряда конденсатора по цепи с обратными диодами.

В этом случае ток нагрузки и напряжение на конденсаторе приближаются к синусоидальной форме (рис. 14.6, в). Необходимые условия для запираания тиристоров по окончании их интервала про-

водимости создаются в процессе формирования кривой тока нагрузки на интервале проводимости обратных диодов (рис. 14.6, з).

Как в режиме непрерывного тока нагрузки, так и в режиме прерывистого тока на интервале проводящего состояния обратных диодов ток через источник питания протекает в обратную сторону. Источник принимает энергию от накопителей энергии (реактивных элементов в цепи нагрузки). При этом происходит рекуперация энергии, накопленной в реактивных элементах колебательного контура и нагрузки, в конденсаторе не происходит накопления энергии, и такая схема работоспособна в режимах короткого замыкания нагрузки.

Контрольные вопросы и задачи

- 14.1. Чем определяются частота и значение напряжения на нагрузке при использовании схем резонансных инверторов?
- 14.2. Что такое эффект накопления энергии?
- ✓ 14.3. *Задача:* в схеме АРИ без обратных диодов (рис. 14.1) $E_d = 100$ В, $C_k = 16$ мкФ, $L_k = 0,76$ мкГн, $R_n = 0$ (режим короткого замыкания нагрузки). Определить:
- 1) собственную частоту резонансного контура f_0 ;
 - 2) значение напряжения на конденсаторе:
 - 2') после первого полупериода формирования кривой выходного тока (U_C');
 - 2'') после второго полупериода формирования кривой выходного тока (U_C'');
 - 2''') после третьего полупериода формирования кривой выходного тока (U_C''');
 - 3) амплитуду тока нагрузки на интервале третьего полупериода формирования кривой выходного тока $I_{k \max}$.
- ✓ 14.4. *Задача:* для условий предыдущей задачи, но при $R_n = 5$ Ом найти:
- 1) значение напряжения на конденсаторе:
 - 1') после первого полупериода формирования кривой выходного тока (U_C');
 - 1'') после второго полупериода формирования кривой выходного тока (U_C'');
 - 1''') после третьего полупериода формирования кривой выходного тока (U_C''');
 - 2) амплитуду тока нагрузки на интервале третьего полупериода формирования кривой выходного тока $I_{k \max}$.
- 14.5. Для чего служат обратные диоды в схемах резонансных инверторов?
- 14.6. Чем определяется количество времени, предоставляемого на восстановление управляющих свойств тиристоров при работе АРИ в режиме непрерывного тока?