

4. АВТОНОМНЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ ИНВЕРТОРЫ

.....

Резонансными называются *автономные инверторы* (АИР), у которых периодический характер электромагнитных процессов в нагрузке обусловлен колебательными свойствами RLC -контура. При этом в схеме развивается колебательный процесс с частотой кратной или близкой к частоте переключения управляемых приборов, при этом ток и напряжение нагрузки имеют почти синусоидальную форму [2].

АИР предназначены для преобразования постоянного напряжения в переменное напряжение повышенной частоты (от 500–1000 Гц до 5–10 кГц и выше). Одной из основных областей применения таких преобразователей является электротермия (индукционная плавка металла, индукционный нагрев и закалка изделий).

АИР обычно выполняют однофазными, преимущественно по мостовой схеме. Возможно три варианта построения LC -контура и нагрузки:

- последовательное включение нагрузки в последовательный LC -контур — последовательные резонансные инверторы;
- параллельное подключение нагрузки LC -контура к L или C ;
- параллельное подключение нагрузки LC -контура к части C .

Эти три вида подключения нагрузки определяют три вида резонансных инверторов:

- последовательный;
- параллельный;
- последовательно-параллельный.

Кроме того, различают резонансные инверторы с закрытым входом, у которых дополнительная индуктивность резонансного контура находится в цепи постоянного тока (на входе), и с открытым входом, у которых эта индуктивность находится на стороне переменного тока (в выходной цепи).

Классификация АИР по принципу энергообмена с источником питания [3] следующая:

- АИР с прямой передачей энергии от источника к нагрузке, или резонансные диссипативные инверторы (РДИ);
- АИР с двусторонним обменом энергии, в которых, наряду с прямой передачей энергии, происходит возврат (рекуперация) энергии в источник питания, которая накоплена в реактивных элементах схемы (РРИ — резонансные рекуперативные инверторы).

4.1. АИР без диодов встречного тока

.....

АИР с односторонней передачей энергии по схемам и принципу действия такие же, как и АИТ. Различия их в том, что параметры схемных элементов подобраны так, что обуславливают колебательный процесс с такой частотой собственных колебаний, при которой ток через вентили становится равным нулю в конце или перед концом полупериода — режимы РЕКТ и РПТ последовательного АИТ. Их схемы также можно подразделить на мостовые, полумостовые, нулевые, несимметричные, одноключевые. По принципу выполнения цепи переменного тока — на параллельные, последовательные, последовательно-параллельные и параллельно-последовательные.

На практике в АИР чаще используют последовательное или последовательно-параллельное включение конденсаторов. Резонансный режим работы инвертора обеспечивает более легкие условия коммутации вентилях при синусоидальном токе с низкими скоростями нарастания и спада тока к нулю, а также увеличенное время восстановления.

4.1.1. Параллельный АИР без диодов встречного тока

Параллельные АИР выполняют по схеме, в которой индуктивность и конденсатор рассчитывают так, чтобы, при отпирании пары накрест лежащих тиристоров, процесс перезаряда конденсатора имел колебательный характер и заканчивался в течение полупериода [2]. В результате этого ток инвертора $i_{\text{и}}$ имеет форму двуполярных импульсов в виде полувольт синусоиды, а входной ток $i_{\text{д}}$ получается прерывистым. Если паузы между окончанием протекания тока через одну пару тиристоров и моментом отпирания тиристоров следующей пары малы или равны нулю, то напряжение на нагрузке близко к синусоиде.

4.1.2. Последовательный АИР без диодов встречного тока [2]

На рис. 4.1 приведена схема АИР, состоящая из инверторного моста на тиристорах VS_1 – VS_4 и последовательно включенных в его диагонали конденсатора C , нагрузки Z_H и дополнительного дросселя L .

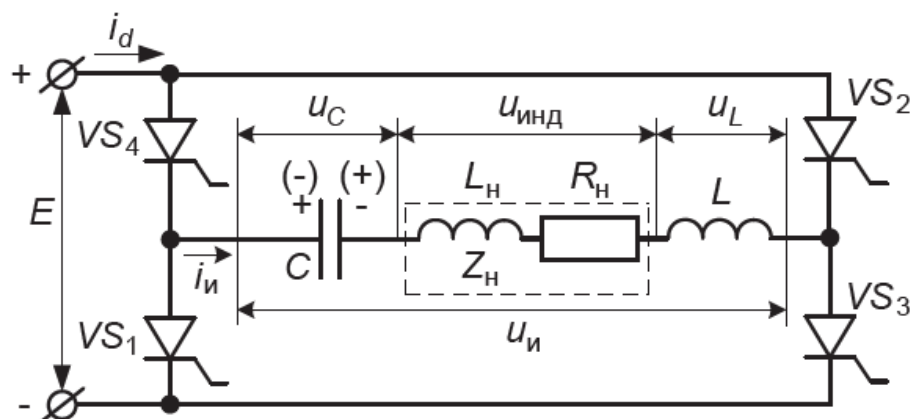


Рис. 4.1. Схема последовательного АИР без диодов встречного тока

Кривая тока выходной цепи инвертора $i_H(t)$ (тока нагрузки i_H) формируется путем попарного отпирания накрест расположенных тиристоров инверторного моста (рис. 4.2, а, в). Характер зависимости $i_H(t)$ обуславливается колебательным процессом перезаряда конденсатора C с частотой

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(L + L_H)C}}$$

последовательного колебательного контура, образованного реактивными элементами выходной цепи, при его подключении проводящими тиристорами к источнику питания E .

В рассматриваемой схеме частота собственных колебаний контура f_0 связана с частотой следования отпирющих импульсов на тиристоры инверторного моста (т. е. с выходной частотой f инвертора) соотношением $f_0 > f$. Таким образом колебательные процессы перезаряда конденсатора (с близким к синусоидальному закону изменения тока $i_H = i_и$) заканчиваются до отпирания очередной пары тиристоров инвертора (рис. 4.2, а, в, г), а в кривых тока нагрузки и источника питания создаются паузы. Токовая пауза необходима для проведения операции записывания проводившей пары тиристоров перед отпиранием очередной

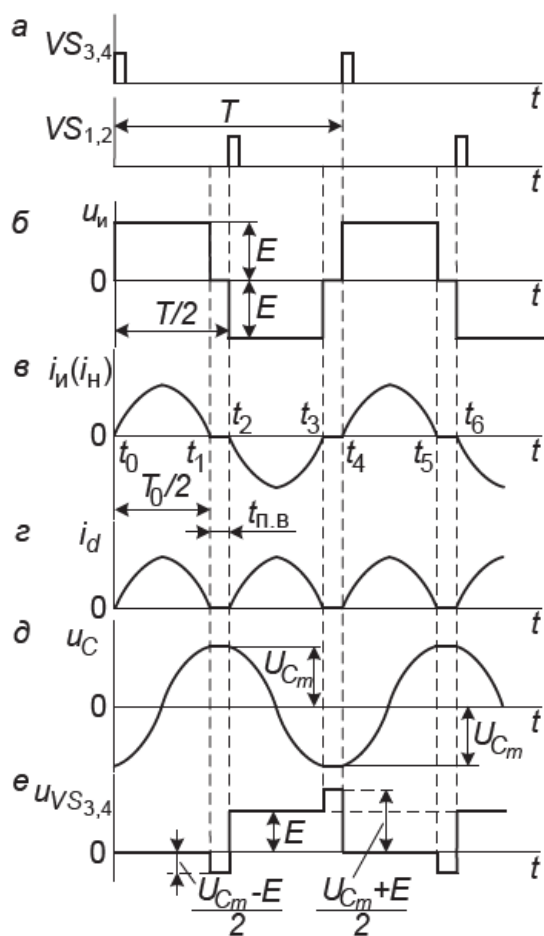


Рис. 4.2. Временные диаграммы, иллюстрирующие электромагнитные процессы в схеме последовательного АИР без диодов встречного тока

пары. По окончании перезаряда (например, к моменту времени t_1) напряжение на конденсаторе $U_{cm} > E$, в связи с чем к проводившим тиристорам (в данном случае тиристорам VS_3, VS_4) прикладывается запирающее обратное напряжение $(U_{cm} - E) / 2$ (рис. 4.2, e). Длительность перезарядных процессов конденсаторов, равная половине периода собственных колебаний контура $T_0 / 2 = 1 / (2f_0)$, определяет длительность открытого состояния тиристоров и двуполярных импульсов кривой напряжения инвертора $u_{и}$ (рис. 4.2, б). Наличие в кривой тока нагрузки паузы характеризует работу АИР с естественным режимом запираания тиристоров. Необходимое при этом различие в частотах f_0 и f подчиняется условию поддержания на проводивших тиристорах требуемой длительности обратного напряжения в целях их запираания

$$t_{п.в} = \frac{1}{2f} - \frac{1}{2f_0} \geq k_{зап} t_B,$$

где $t_{п.в}$ — время, предоставляемое тиристорам для восстановления запирающих свойств;

$k_{зап}$ — коэффициент запаса, $k_{зап} = 1,2 \dots 1,5$;

t_B — время выключения тиристора.

4.1.3. Внешние характеристики АИР [2]

При неизменном напряжении питания E , выходное напряжение АИР зависит только от значения $\cos \varphi_n$. Уменьшение $\cos \varphi_n$ вызыва-

ет увеличение выходного напряжения инвертора (рис. 4.3). Спадающий характер реальных выходных характеристик при фиксированных значениях $\cos \varphi_n$ объясняется зависимостью $E = f(I_d)$ источника питания (его внешней характеристикой), а также падениями напряжения на вентилях и активном сопротивлении дросселя.

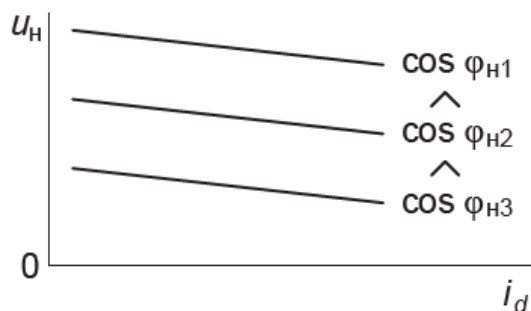


Рис. 4.3. Внешние характеристики АИР

Важной особенностью АИР (по сравнению с АИТ и АИН) является его работоспособность в режиме короткого замыкания нагрузки. Векторная диаграмма АИР в режиме короткого замыкания приведена на рис. 4.4, где $U_L = U_C = I_n \omega L = I_n (1/\omega C)$. Ток инвертора $I_n = U_n / R_n$ при этом ограничивается суммарным активным сопротивлением обмотки дросселя L , подводящих проводов, падением напряжения на вентилях и может оказаться чрезмерно большим.

При отключении нагрузки (режим холостого хода) работа инвертора невозможна, поскольку в таком случае прекращается формирование кривой выходного напряжения (тока). Для обеспечения работоспособности инвертора, при отключении нагрузки к его выходу иногда подключается балластный резистор с небольшим потреблением мощности.

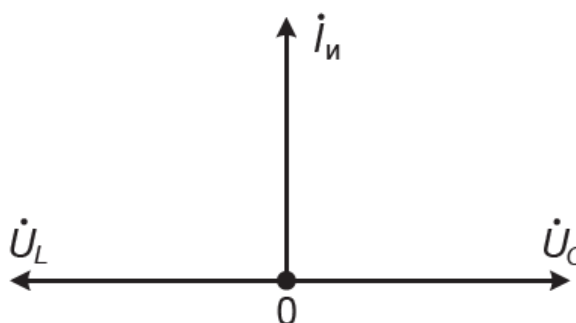


Рис. 4.4. Векторная диаграмма АИР в режиме короткого замыкания

4.1.4. Компенсация реактивной мощности нагрузки [2]

В некоторых случаях применения АИР, нагрузка обладает большой индуктивностью L_n (например, индуктор электротермической установки). Из-за малого $\cos \varphi_n$ возникают трудности оптимального использования тиристоров инвертора по току и напряжению для получения требуемых мощности и напряжения нагрузки. Задачу решают подключением параллельно нагрузке конденсатора $C_{пар}$ (рис. 4.5), на-

строенного в резонанс с L_H . Помимо указанного, параллельно включенный конденсатор вызывает приближение к синусоиде кривой напряжения u_H .

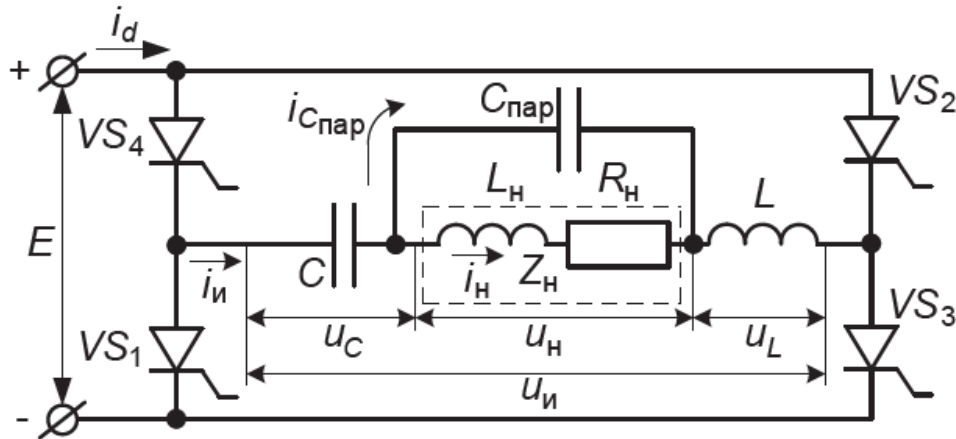


Рис. 4.5. Схема АИР с компенсирующим конденсатором, подключаемым параллельно нагрузке

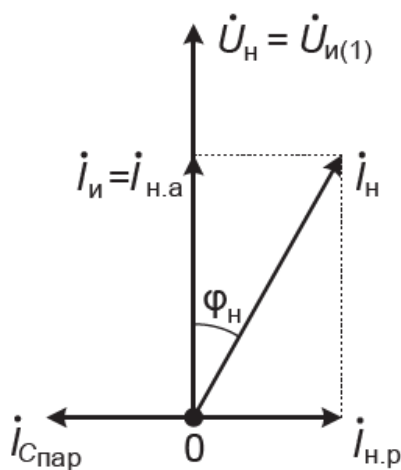


Рис. 4.6. Векторная диаграмма АИР при компенсации

Таким образом, выходная цепь инвертора оказывается составленной из двух резонансных контуров, настроенных на одну и ту же частоту ($\omega = \omega_0$). Один из колебательных контуров является последовательным ($L - C$), а другой ($L_H - R_H - C_{\text{пар}}$) — параллельным. Для параллельного колебательного контура действительна векторная диаграмма, приведенная на рис. 4.6.

В последовательном колебательном контуре при резонансе, напряжения равны $u_C = u_L$ и находятся в противофазе, в связи с чем к параллельному колебательному контуру и нагрузке прикладывается напряжение $u_H = u_{и(1)}$. В параллельном же колебательном контуре при резонансе наблюдается равенство реактивных составляющих токов $I_{C_{\text{пар}}} = I_{н.р}$, в связи с чем ток инвертора будет определяться активной составляющей тока нагрузки $I_{и} = I_{н.а} = I_H \cos \varphi_H$, а ток нагрузки

$$I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{и(1)}}}{\sqrt{(\omega L_{\text{н}})^2 + R_{\text{н}}^2}}.$$

Введение компенсации позволяет уменьшить ток инвертора $I_{\text{и}}$ и соответственно токи тиристоров, а питание схемы осуществить более высоким напряжением, что благоприятно сказывается на КПД преобразователя.

В рассмотренных схемах АИР, условия для запираания проводивших тиристоров создаются на этапах токовых пауз. С увеличением частоты относительная продолжительность токовых пауз возрастает, и они занимают значительную часть периода кривой тока. С ростом частоты мощность, отдаваемая в нагрузку, уменьшается, а форма кривой тока существенно отличается от синусоиды.

4.2. АИР с диодами встречного тока без умножения частоты

.....

Схемы РРИ с двухсторонним обменом энергии строятся с использованием дополнительных элементов (диодов, тиристоров, конденсаторов, дросселей), образующих цепи рекуперации. Как было отмечено выше, рекуперация энергии, накопленной либо в конденсаторах, либо в дросселях, осуществляется цепями двух видов [3].

Первый вид рекуперации энергии, накопленной в конденсаторах, реализуется посредством диодов встречного тока, которые включаются встречно-параллельно прямым вентилям инвертора и вступают в действие после окончания тока в прямых вентилях, когда весь запас энергии сосредоточен в конденсаторах.

Второй вид рекуперации энергии, накопленной в дросселях, осуществляется посредством отсекающих диодов, которые вступают в действие при ненулевом токе инвертора, когда запас энергии сосредоточен в дросселях, при этом происходит переключение тока прямых вентилях в цепь отсекающих диодов, на интервале проводимости которых ток протекает в обратном направлении через источник питания до тех пор, пока энергия, накопленная в дросселях, не будет полностью рекуперирована.

Третий вид рекуперации связан с ограничением уровня напряжения на нагрузке, который реализуется посредством обратных диодов,

образующих цепи рекуперации энергии, накапливаемой в реактивных элементах контура нагрузки и включающихся в моменты, когда уровень напряжения нагрузки превышает напряжение источника питания или какой-то его части.

Второй и третий виды рекуперации в пособии не рассматриваются.

Для улучшения показателей инвертора, при переходе в область повышенных частот (от 2–3 до 5–10 кГц), исходную схему инвертора дополняют диодами встречного тока. Схема АИР с обратными диодами приведена на рис. 4.7. Дроссель L вводят при малом значении L_H (когда конденсатор $C_{\text{пар}}$ может отсутствовать) или при большом значении L_H , когда компенсирующий конденсатор $C_{\text{пар}}$ используется.

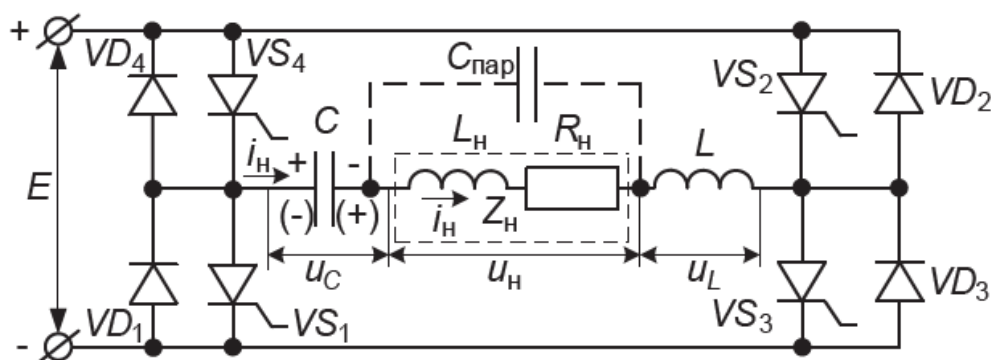


Рис. 4.7. Схема АИР с диодами встречного тока

Особенность процессов, протекающих в схеме, заключается в том, что каждый такт отпираания накрест расположенных тиристоров сопровождается формированием двух полуволн кривой тока нагрузки. Первая полуволна обуславливается колебательным характером процесса перезаряда конденсатора от источника питания через открытые тиристоры, а вторая — процессом обратного перезаряда конденсатора через шунтирующие их обратные диоды. За время формирования второй полуволны тока нагрузки создаются условия для восстановления запирающих свойств проводивших тиристоры: к тиристорам прикладывается обратное напряжение, равное падению напряжения на обратных диодах от протекания через них тока перезаряжающегося конденсатора (тока нагрузки).

В инверторе возможно три режима работы: режим прерывистого тока (РПТ), режим граничного тока (РГТ) и режим непрерывного тока (РНТ).

4.2.1. Режим прерывистого тока [2]

Режиму прерывистого тока соответствует соотношение частот $\omega_0 > 2\omega$, где ω_0 — собственная резонансная частота выходной цепи, $\omega_0 = 2\pi / T_0$, а ω — выходная частота инвертора, $\omega = 2\pi / T$. Временные диаграммы, характеризующие процессы в инверторе в режиме прерывистого тока нагрузки, приведены на рис. 4.8. С отпиранием в момент времени t_0 тиристоров VS_3, VS_4 (см. рис. 4.7, 4.8, а, б) создается контур колебательного перезаряда конденсатора C в цепи с источником питания, нагрузкой Z_n и дросселем L . В этой цепи в интервале $t_0 - t_1$ формируется полуволна тока i_H (рис. 4.8, б). К моменту времени t_1 ток i_H и токи тиристоров VS_3, VS_4 (рис. 4.8, з) уменьшаются до нуля. За счет наличия в цепи перезаряда источника питания, напряжение на конденсаторе в момент времени t_1 (рис. 4.8, в) превышает напряжение E (полярность напряжения на конденсаторе указана на рис. 4.7 без скобок). Вследствие этого с момента времени t_1 наступает второй полупериод колебательного (обратного) перезаряда конденсатора по цепи с диодами VD_3, VD_4 . Процесс продолжается в интервале $t_1 - t_2$ (рис. 4.8, б), в течение которого энергия, накопленная в конденсаторе, отдается в цепь источника питания и нагрузки. К тиристорам VS_3, VS_4 (рис. 4.8, е) прикладывается обратное напряжение, равное падению

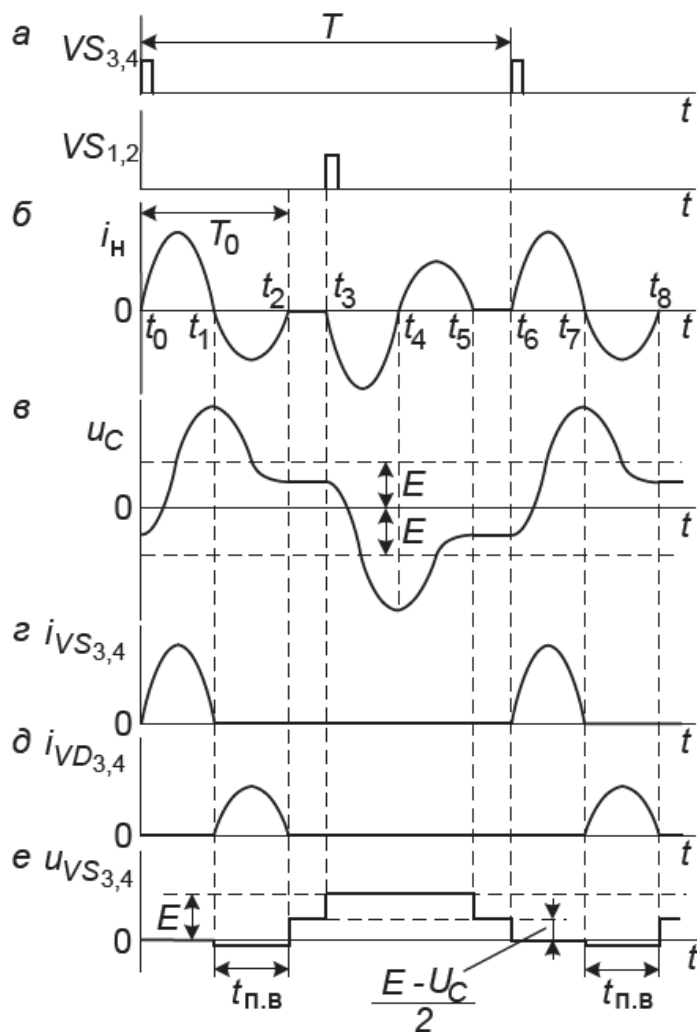


Рис. 4.8. Временные диаграммы АИР с диодами встречного тока в РПТ

напряжения на диодах VD_3, VD_4 (0,8–1,2 В) от протекания через них тока нагрузки (рис. 4.8, *д*). К моменту времени t_2 , ток i_n уменьшается до нуля, диоды VD_3, VD_4 запираются. Напряжение на конденсаторе снижается до уровня $u_c < E$ (рис. 4.8, *е*) и остается неизменным до отпирания очередной пары тиристоров. В интервале t_2-t_3 ток будет $i_n = 0$ (рис. 4.8, *б*) и к тиристорам VS_3, VS_4 прикладывается напряжение в прямом направлении, равное полуразности напряжений источника питания и конденсатора (рис. 4.8, *е*).

В момент времени t_3 отпираются тиристоры VS_1, VS_2 и происходят аналогичные процессы перезаряда конденсатора: в интервале t_3-t_4 — с проводящими тиристорами VS_1, VS_2 , в интервале t_4-t_5 — с проводящими диодами VD_1, VD_2 . При этом к тиристорам VS_3, VS_4 прикладывается в прямом направлении напряжение E . В последующем процессы в схеме повторяются.

4.2.2. Режим граничного тока

Режиму граничного тока соответствует соотношение частот $\omega_0 = 2\omega$. Данный режим характеризуется тем, что изменение пути протекания тока нагрузки между диодами и тиристорами происходит при снижении тока до нуля, но при этом интервал бестоковой паузы бесконечно мал.

В теории режим граничного тока достигается точной настройкой контура нагрузки, которую невозможно осуществить на практике по двум причинам. Первая: для заданных параметров индуктора практически невозможно подобрать емкость конденсаторной батареи, поскольку серийно изготавливаемые конденсаторы имеют стандартный ряд значений емкостей. Возможна коррекция частоты управления тиристорами, но тогда будет изменена выходная частота тока инвертора. Вторая причина: даже если получится настроить режим близкий к РГТ, при работе реального индуктора его параметры не будут оставаться постоянными и настроенный РГТ плавно переместится в РПН или РНТ.

Таким образом, на практике схема АИР в РГТ может работать только на коротком промежутке времени, а стабилизация РГТ путем коррекции частоты управления не актуальна из-за низких энергетических показателей этого режима.

4.2.3. Режим непрерывного тока [2]

Временные диаграммы, характеризующие процессы в инверторе в режиме нагрузки, приведены на рис. 4.9, *а–е*.

Режиму непрерывного тока соответствует соотношение собственной резонансной частоты выходной цепи и частоты следования управляющих импульсов, при котором $\omega_0 < 2\omega$ или $T_0 > T/2$. Очередное отпирание тиристоров осуществляется здесь до завершения перезаряда конденсатора в цепи с обратными диодами, в связи с чем кривые тока нагрузки и напряжения на конденсаторе приближаются по форме к синусоиде (рис. 4.9, а–в). Необходимые условия для запираания тиристоров по окончании их интервала проводимости создаются в процессе формирования кривой тока нагрузки, когда про-

водят ток обратные диоды (рис. 4.9, б, д, е). Благодаря близкой к синусоиде форме кривой тока, а также лучшему использованию тиристоров по току, режим непрерывного тока нагрузки нашел преимущественное применение на практике.

На рис. 4.10 показан график тока контура нагрузки последовательного АИР для настройки на оптимальный режим работы по критерию минимизации содержания высших гармоник. Выход на оптимальный режим соответствует повышению периода резонансных колебаний, при этом уменьшается временной интервал проводимости диодов встречного тока. Пределом уменьшения интервала проводимости диодов в общем виде является равенство этого интервала времени восстановления запирающих свойств тиристоров.

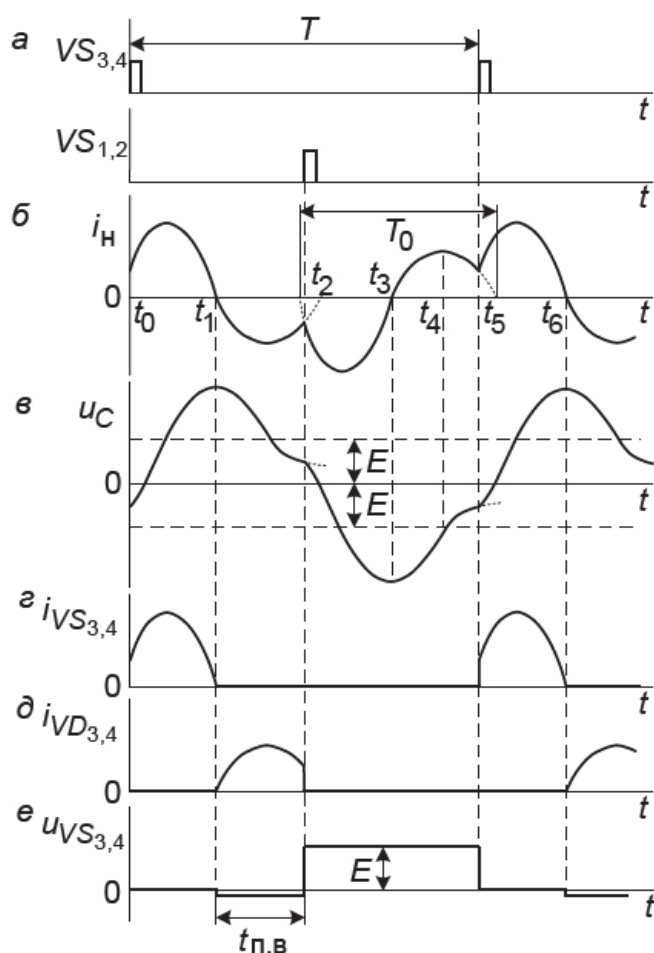


Рис. 4.9. Временные диаграммы АИР с диодами встречного тока в РНТ

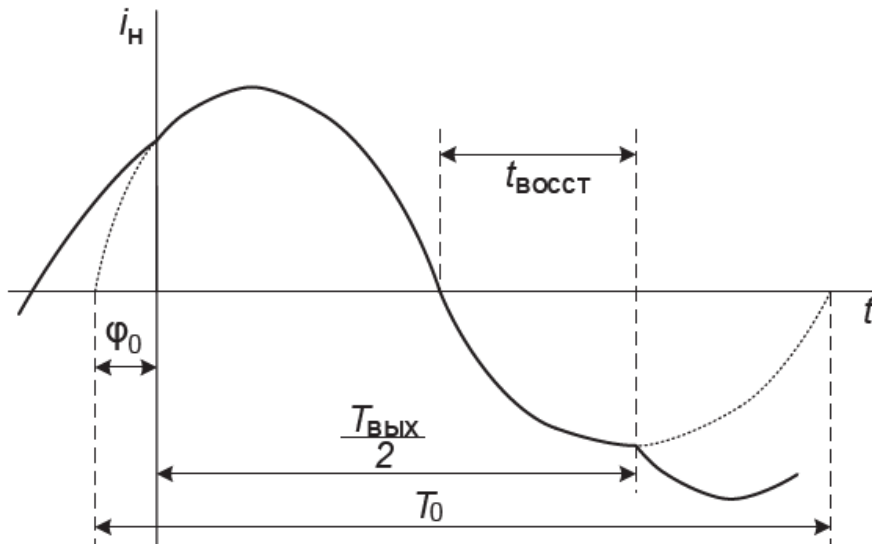


Рис. 4.10. Диаграмма тока контура нагрузки последовательного АИР при настройке на оптимальный режим работы по критерию минимизации содержания высших гармоник

График тока на интервале периода резонансных колебаний описывается выражением

$$i = I_0 e^{-\lambda t} \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (4.1)$$

где I_0 — начальное амплитудное значение тока.

Переключение между парами тиристор — диод разных плеч моста в РНТ осуществляется при ненулевом значении тока, т. е. на границах полупериодов выходного тока значения тока равны и имеют противоположное направление — разные знаки,

$$i_H|_{t=0} = -i_H|_{t=\frac{T_{\text{вых}}}{2}}, \quad (4.2)$$

или с учетом выражений (4.1) и (4.2)

$$\sin \varphi_0 = -e^{-\lambda \frac{T_{\text{вых}}}{2}} \sin\left(\omega_0 \frac{T_{\text{вых}}}{2} + \varphi_0\right).$$

Однако интервал полупериода выходного тока с учетом составляющих его интервалов может быть описан выражением

$$\frac{T_0}{2} - \frac{\varphi_0 T_{\text{вых}}}{360} + t_{\text{восст}} = \frac{T_{\text{вых}}}{2},$$

при этом второе слагаемое в левой части учитывает пересчет из градусов в секунды (с учетом значения периода выходного тока) вычита-

емого начального угла φ_0 , не входящего в рассматриваемый полупериод выходного тока.

Таким образом, указанный интервал полупериода выходного тока описывается системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \sin \varphi_0 &= -e^{-\lambda \frac{T_{\text{ВЫХ}}}{2}} \sin\left(\omega_0 \frac{T_{\text{ВЫХ}}}{2} + \varphi_0\right), \\ \frac{T_0}{2} - \frac{\varphi_0 T_{\text{ВЫХ}}}{360} + t_{\text{восст}} &= \frac{T_{\text{ВЫХ}}}{2}, \\ \omega_0 &= \frac{2\pi}{T_0}. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Для настройки схемы АИР на оптимальный режим непрерывных токов требуется решить систему уравнений (4.3), определив период резонансных колебаний T_0 .

Решение системы уравнений возможно либо графическим, либо итерационным способом, при этом необходимо помнить, что значение периода резонансных колебаний в РНТ удовлетворяет условию

$$\frac{T_{\text{ВЫХ}}}{2} < \frac{T_0}{2} < T_{\text{ВЫХ}}.$$

4.3. АИР с диодами встречного тока с удвоением частоты [2]

Ограничение в использовании резонансных инверторов по частоте обусловлено увеличением мощности потерь в тиристорах при их переключениях, а также конечным временем выключения тиристорov. Одним из эффективных путей повышения рабочей частоты является работа инвертора в режиме, при котором частоте f_1 переключения тиристорov соответствует частота $f = 2f_1$ тока нагрузки. Такой режим работы характерен для АИР с удвоением частоты (рис. 4.11).

В данную схему входит инверторный мост на тиристорах VS_1 – VS_4 и диодах VD_1 – VD_4 с конденсатором C и дросселем L , которые включены в диагонали моста. Активно-индуктивная нагрузка Z_n подключена параллельно другой диагонали инверторного моста через разделительный конденсатор C_p . Емкости конденсаторов C и C_p равны (хотя иногда принимают $C > C_p$). В цепи постоянного тока инверто-

ра расположен сглаживающий дроссель L_d , индуктивность которого превышает индуктивности L и L_H . Процессы в схеме поясняют временные диаграммы, приведенные на рис. 4.12, $a-d$.

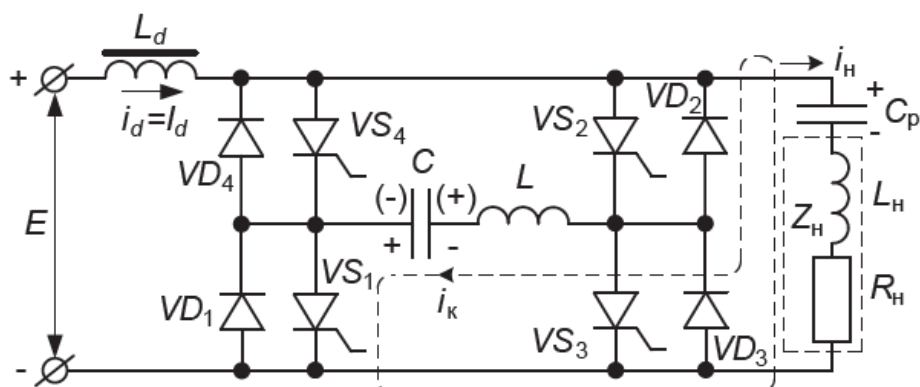


Рис. 4.11. Схема АИР с удвоением частоты

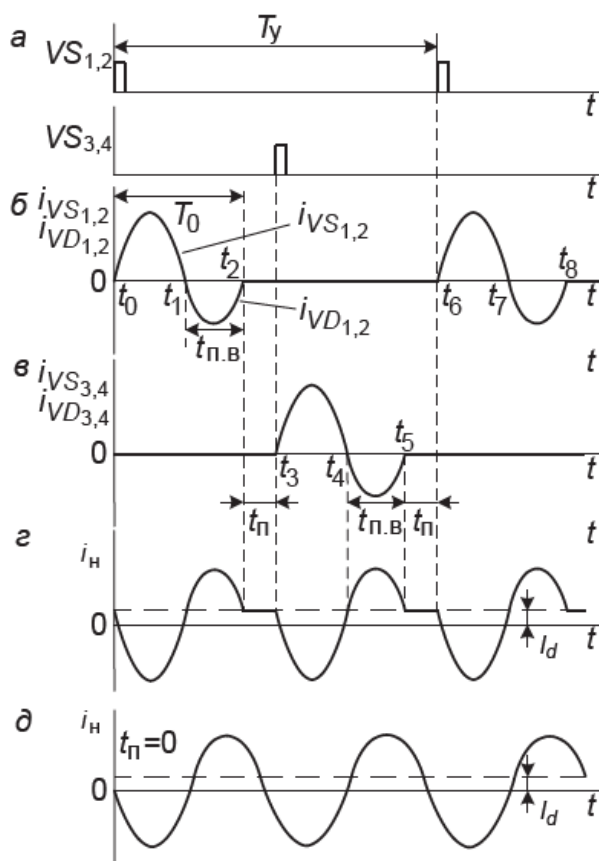


Рис. 4.12. Временные диаграммы АИР с удвоением частоты

Работа схемы основана на поочередном отпирании накрест лежащих тиристоров VS_1, VS_2 и VS_3, VS_4 (рис. 4.12, a) и подключении ими конденсатора C и дросселя L параллельно выходной цепи инвертора. Ток в нагрузке i_H (рис. 4.12, $г$) представляет собой разность тока источника питания ($i_d - I_d$) и тока перезаряда конденсаторов C и C_p в контуре с открытыми тиристорами инвертора. Так, с момента времени t_0 формирование полуволны тока i_H связано с колебательным процессом перезаряда конденсаторов C_p и C в цепи с дросселем L , нагрузкой Z_H при открытых тиристорах VS_1, VS_2 (контур перезаряда показан на рис. 4.11

пунктиром). Полярность напряжения на конденсаторе C перед перезарядом указана на схеме без скобок. Процесс перезаряда протекает в два этапа. На первом этапе (интервал t_0-t_1) он сопровождается протеканием тока колебательного контура i_k через тиристоры VS_1, VS_2 (рис. 4.12, б), на втором, после изменения направления тока i_k , — через шунтирующие их диоды VD_1, VD_2 . Ввиду отдачи энергии конденсаторов в цепь нагрузки, процесс перезаряда носит затухающий характер. Этим объясняется уменьшение амплитуды тока i_k на этапе его протекания через обратные диоды. В интервале t_1-t_2 создаются условия, необходимые для запираания ранее проводивших тиристоров VS_1, VS_2 . К ним прикладывается обратное напряжение, равное падению напряжения на диодах VD_1, VD_2 . В интервале t_2-t_3 (рис. 4.12, б) тиристоры инвертора заперты. Ток нагрузки в этом интервале определяется током $i_d = I_d$ заряда конденсатора C_p (рис. 4.12, в).

С момента времени t_3 формирование очередной полуволны тока i_n обусловлено отпиранием тиристоров VS_3, VS_4 и связано с аналогичным процессом перезаряда конденсаторов C и C_p . Полярность напряжения на конденсаторе C перед перезарядом указана на рис. 4.11 в скобках. В дальнейшем процессы в схеме повторяются.

Рассмотренный режим работы инвертора характеризуется наличием интервалов паузы t_n (рис. 4.12, в) в токе i_k контура $C-L$.

Для приближения к синусоиде кривой тока $i_n(t)$, элементы контура выбирают с таким расчетом, чтобы $t_n = 0$ (рис. 4.12, д). Указанному отвечает соотношение частот $f = 2f_0$,

$$\text{где} \quad f_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{(L_n + L) \frac{CC_p}{C + C_p}}}.$$

Существенной особенностью рассмотренной схемы является ее работоспособность в режиме короткого замыкания в выходной цепи, а при наличии дополнительного балластного резистора — и в режиме холостого хода.