

1. Структурные и принципиальные электрические схемы устройств для преобразования электрической энергии на постоянном и переменном токе.

2. Расчёт параметров и выбор элементной базы преобразователей.

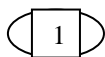


Рис. 7. Преобразователь постоянно-постоянного тока со звеном переменного тока

Структурная схема преобразователя может отражать, как общий характер преобразования (по первому классификационному признаку), так и более детальное изображение составных частей его со всеми межблочными связями. Например, на рис. 7 приведена структурная схема преобразователя постоянно-постоянного тока со звеном переменного тока.

Одной и той же структурной схеме преобразователя могут соответствовать несколько схемных решений, различающихся, главным образом, элементной базой. В связи с этим возникает проблема определения оптимального варианта преобразователя. В качестве критериев оптимизации при условии соответствия различного рода преобразователей техническим требованиям выступают следующие:

- КПД преобразователя;
- массогабаритные показатели;
- удельные энергетические показатели;
- соответствие требованиям ПУЭ, ПТЭ и ПТБ, СНиП, СанПиН, экологии;
- дизайн преобразователя;
- эргономические требования и т.д.

Развитие полупроводниковой техники позволило кардинально изменить ситуацию в производстве преобразователей. Появление мощных быстродействующих транзисторов, тиристоров, диодов и пр. позволило в ряде случаев отказаться от материалоемких и громоздких вращающихся преобразователей и перейти к их полупроводниковым аналогам, сократив затраты на производство, удешевив и повысив их надежность. Однако полупроводниковые преобразователи электрической энергии не являются полными аналогами, например, вращающихся преобразователей и поэтому требуют применения дополнительных устройств, обеспечивающих не только их функционирование, но и получение необходимых выходных характеристик. Эти устройства получили названия «фильтры» - входные, выходные и т.д. Как правило, фильтровые устройства выполняются на пассивных элементах – дросселях, конденсаторах, резисторах и т.д., но могут содержать и активные, например, полупроводниковые элементы. Структурная схема полупроводникового преобразователя приведена на рис 8, а на рис. 9 – соответствующая ей принципиальная электрическая схема силовых цепей тиристорного частотно-импульсного регулятора постоянного тока.

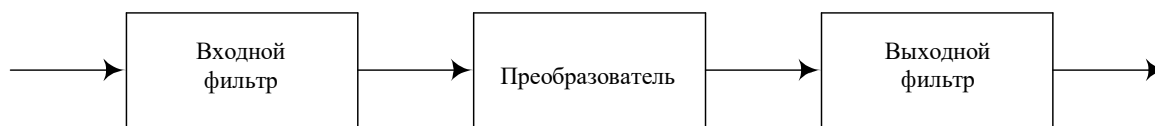


Рис. 8. Структурная схема полупроводникового преобразователя

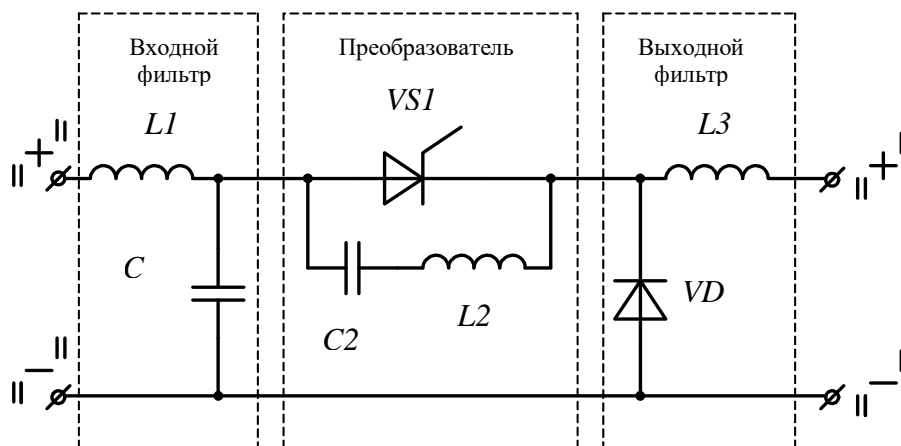


Рис. 9. Принципиальная электрическая схема силовых цепей тиристорного регулятора постоянного тока

Рассмотрим наиболее распространённые устройства, обеспечивающие электромагнитную совместимость источников электрической энергии и её потребителей.

### Выпрямители.

Выпрямители относятся к преобразователям переменного тока в постоянный. Здесь необходимо отметить, что переменный ток носит синусоидальный характер, и выпрямление его в однофазных цепях приводит к преобразованию синусоиды в пульсирующий (положительной полуволны) ток. Потребители в большинстве своём не допускают питания от источника с падением тока до нуля. Поэтому в цепях выпрямителей используются устройства для

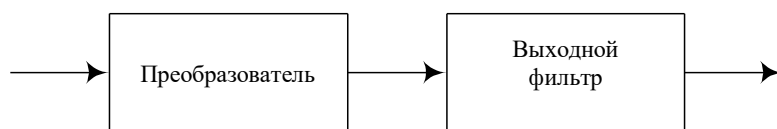
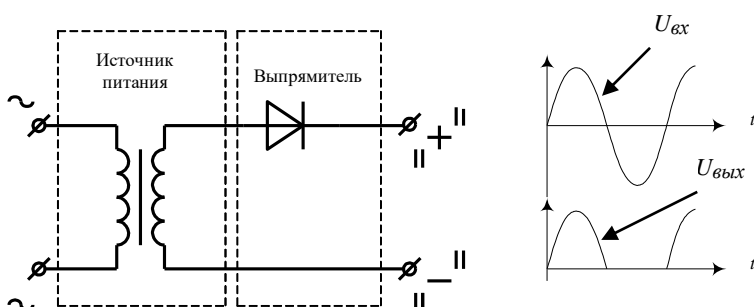
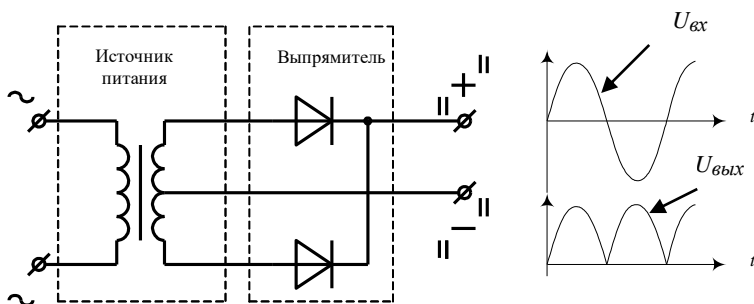


Рис. 10. Структурная схема выпрямителя

#### 1. Однополупериодная схема выпрямления



#### 2. Двухполупериодная схема выпрямления



#### 3. Мостовая схема выпрямления

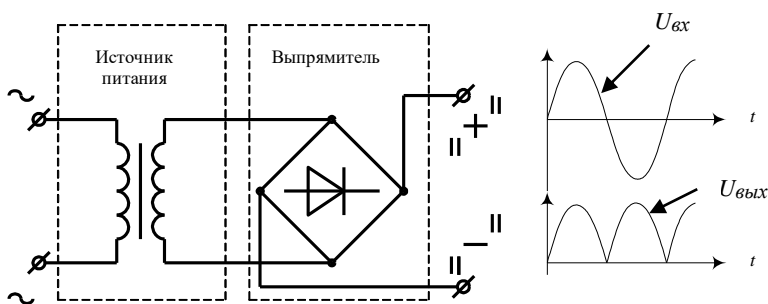


Рис. 11. Схемные решения выпрямителей

сглаживания пульсаций – фильтры. Структурная схема выпрямителя приведена на рис. 10.

Элементной базой выпрямителей являются полупроводниковые приборы. В том случае, когда нет необходимости регулировать величину выпрямленного напряжения, в цепях выпрямителя используются диоды, в противном случае управляемые – тиристоры, симисторы, транзисторы.

#### Классификация выпрямителей.

1. По количеству фаз питающей цепи: одно- и многофазные;

2. По схеме выпрямления: одно- и двухполупериодные, мостовые;

3. По элементной базе: диодные, тиристорные, симисторные, транзисторные;

4. По уровню выпрямленного напряжения: с регулируемым и нерегулируемым выходным напряжением.

В некоторых слаботочных цепях выпрямление напряжения совмещается с кратным повышением его по отношению к величине выпрямленного путём включения в цепь конденсаторов, разделённых диодами (т.н. схемы умножения). Однако здесь они не рассматриваются.

В маломощных цепях, питающихся, как правило, от однофазной сети переменного тока используются одно-, двухполупериодные и мостовые схемы выпрямления. Принципиальные электрические схемы цепей выпрямителей и диаграммы мгновенных значений входного и выходного напряжений приведены на рис. 11.

В случае необходимости получения регулируемого выходного напряжения в цепях выпрямителя используются, например, тиристоры. Схема выпрямителя на тиристорах и диаграммы выходного напряжения при углах проводящего состояния  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  приведены на рис. 12.

В трёхфазных силовых цепях применяются, как правило, мостовые схемы выпрямления. На рис. 13 приведена принципиальная электрическая схема цепей выпрямителя мостового типа и диаграммы входного и выходного напряжений.

Из приведённых диаграмм видно, что кривая выпрямленного напряжения носит пульсирующий характер и в большинстве случаев сглаживается при помощи выходных фильтров. Необходимо отметить, что

при подключении к выпрямителю без фильтра активно-индуктивной нагрузки также происходит сглаживание пульсаций тока нагрузки и кривой выпрямленного напряжения, но при использовании фильтров эффект сглаживания – выше.

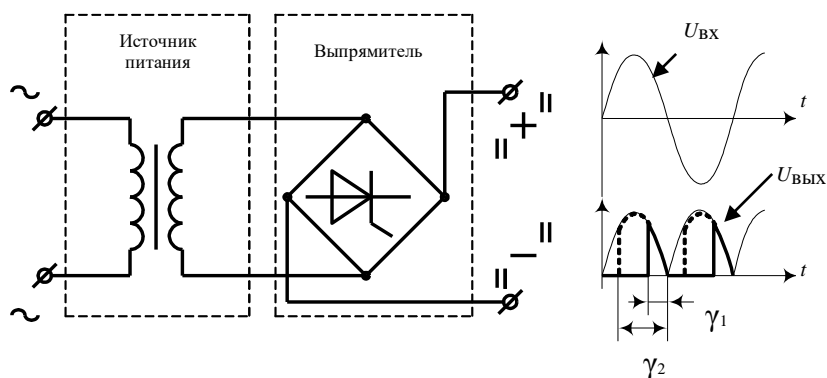


Рис. 12. Однофазный тиристорный выпрямитель

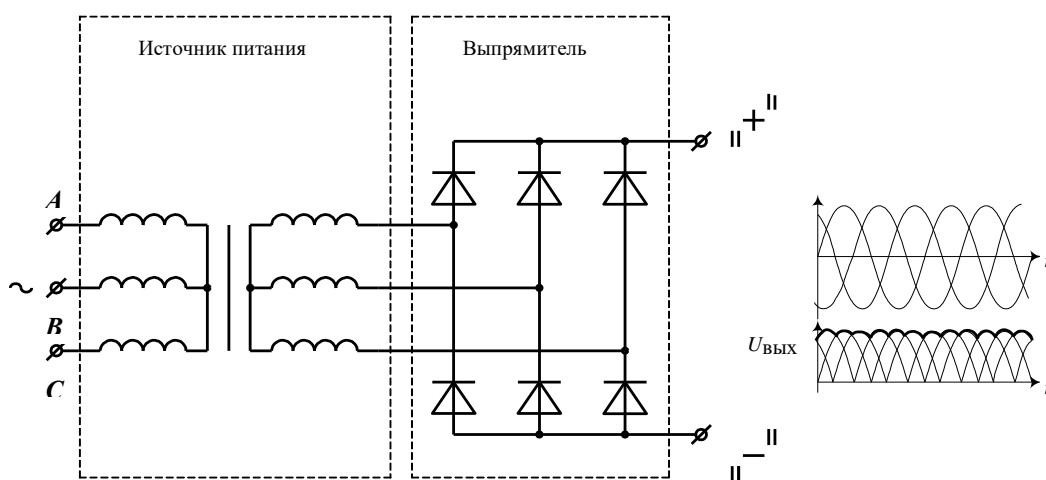


Рис. 13. Трёхфазный мостовой выпрямитель на диодах

### Инверторы.

Инверторами называются преобразователи постоянного тока или напряжения в переменный ток или напряжение. Структурная схема инвертора аналогична структурной схеме выпрямителя, представленной на рис. 10. Рассмотрим принцип работы инвертора напряжения на примере трехфазного инвертора, работающего на асинхронный двигатель (см. рис. 14).

Примем допущение о том, что коммутирующие ключи  $K1...K6$  – идеальные (т.е. коммутация их происходит мгновенно, в проводящем состоянии их сопротивление равно нулю, а в непроводящем состоянии –  $\infty$ ). Для облегчения пояснения принципа работы на диаграммах справа приведены интервалы времени проводящего состояния ключей, присоединённых к фазам  $a$ ,  $b$  и  $c$  асинхронного мотора  $M$ , а также разности потенциалов (напряжения), приложенного к фазам  $a$  и  $b$  мотора. При этом на диаграммах проводящего состояния ключей по каждой фазе мотора верхняя относительно оси абсцисс зона принадлежит нечетному ключу ( $K1, K3, K5$ ), а нижняя – четному ( $K2, K4, K6$ ).

Пусть в момент времени  $t=0$  (см. диаграммы) были замкнуты ключи  $K1$  и  $K4$ . Ток в цепи протекал по контуру «+» ИП – ключ  $K1$  – фаза  $a$  мотора – фаза  $b$  мотора – ключ  $K4$  – «-» ИП (ИП – источник питания). Приложенное к фазам  $a$  и  $b$  напряжение источника питания делилось между ними поровну, но фаза  $a$  подключалась к «+», а фаза  $b$  – к «-» источника питания. Поэтому напряжение, приложенное к фазам  $a$  и  $b$   $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = U/2 - (-U/2) = U$ . В момент времени  $T/6$  размыкается ключ  $K4$  и замыкается ключ  $K6$ . Фаза  $a$  мотора продолжает получать питание от «+» ИП, а фаза  $b$  обесточивается. Ток в цепи протекает по контуру «+» ИП – ключ  $K1$  – фаза  $a$  мотора – фаза  $c$  мотора – ключ  $K6$  – «-» ИП. Напряжение, приложенное к фазам  $a$  и  $b$   $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = U/2 - 0 = U/2$ . В момент времени  $T/3$  размыкается ключ  $K1$  и замыкается ключ  $K3$ . Ток в цепи протекает по контуру «+» ИП – ключ  $K3$  – фаза  $b$  мотора – фаза  $c$  мотора – ключ  $K6$  – «-» ИП. При этом  $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 0 - U/2 = -U/2$ . В момент времени  $T/2$  размыкается ключ  $K6$  и замыкается ключ  $K2$ . Фаза  $a$  мотора подключается к «-» источника питания, а фаза  $b$  остаётся присоединённой к «+». Ток в цепи протекает по контуру «+» ИП – ключ  $K3$  – фаза  $b$  мотора – фаза  $a$  мотора – ключ  $K2$  – «-» ИП. Таким образом, направление тока в фазе  $a$  изменяется на противоположное по сравнению с началом периода. При этом

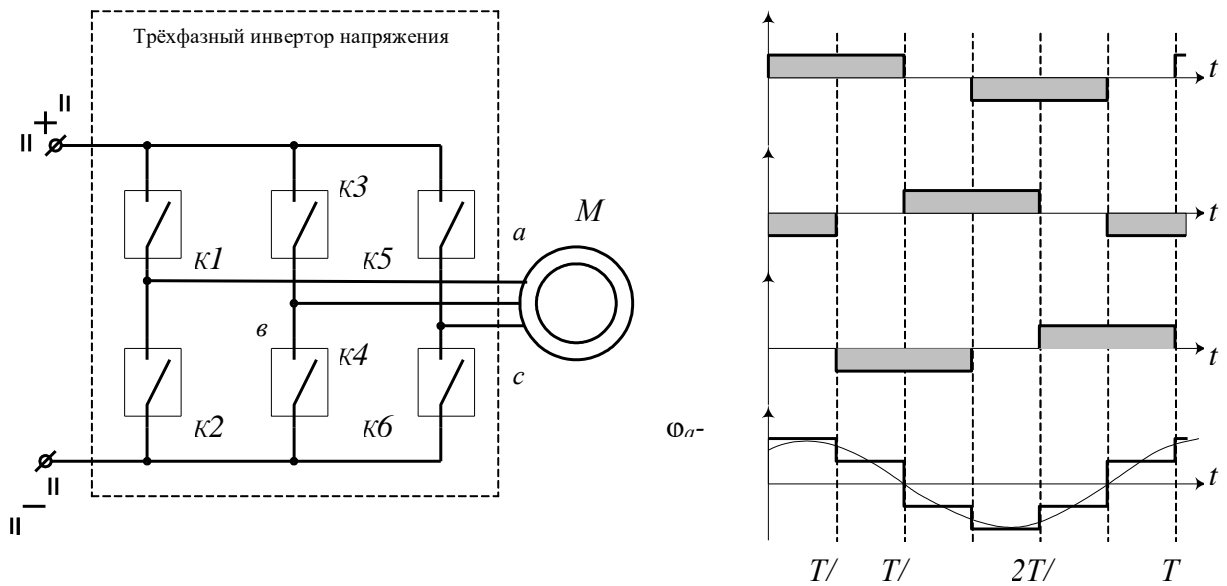


Рис. 14. Трёхфазный автономный инвертор со 120° системой управления

$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = (-U/2) - U/2 = -U$ . В момент времени  $2T/3$  размыкается ключ  $K3$  и замыкается –  $K5$ . Фаза  $a$  при этом остаётся подключенной к «-» источника питания, а фаза  $b$  – не получает питания. Ток в цепи протекает по контуру «+» ИП – ключ  $K5$  – фаза  $c$  мотора – фаза  $a$  мотора – ключ  $K2$  – «-» ИП. Напряжение между фазами  $a$  и  $b$  мотора при этом  $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = (-U/2) - 0 = -U/2$ . В момент времени  $5T/6$  размыкается ключ  $K2$  и замыкается ключ  $K4$ . Ток в цепи протекает по контуру «+» ИП – ключ  $K5$  – фаза  $c$  мотора – фаза  $b$  мотора – ключ  $K4$  – «-» ИП. При этом  $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 0 - (-U/2) = U/2$ . В момент времени  $T$  размыкается ключ  $K5$  и замыкается ключ  $K1$ . Ток в цепи также, как и с момента времени  $t=0$ , протекает по контуру «+» ИП – ключ  $K1$  – фаза  $a$  мотора – фаза  $b$  мотора – ключ  $K4$  – «-» ИП. Напряжение между фазами  $a$  и  $b$  мотора при этом  $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = U/2 - (-U/2) = U$ . Далее процессы в схеме повторяются.

Форма линейного напряжения между фазами мотора довольно далека от синусоиды, которая и должна питать двигатель. Полученная кривая питающего двигатель напряжения может быть разложена в ряд Фурье, с целью оценки влияния каждой гармоники на потери в моторе, а, следовательно, и на КПД преобразования в целом. На рис. 14 приведена первая гармоника разложения, имеющая амплитуду, равную напряжению питания.

В электротехнике такая схема работы инвертора получила название «120°эл. схемы управления» поскольку каждый из ключей находится в проводящем состоянии  $1/3$  периода. Существует и 180°эл. схема управления работой инвертора, при работе по которой форма линейного напряжения отличается от рассмотренной, а время проводящего состояния каждого из ключей составляет половину периода. В качестве примера рассмотрим схему электрических цепей трёхфазного инвертора напряжения на базе тиристоров, приведённую на рис. 15, а диаграммы – на рис. 16.

Принцип работы схемы заключается в следующем. В интервале времени  $0-T/6$  в проводящем состоянии находятся тиристоры  $VS1, VS4$  и  $VS5$ . При соединении обмоток ротора мотора  $M$  в звезду приложенное к обмотке фазы  $A$  напряжение составляет  $1/3$  напряжения питания, к обмотке  $B$  –  $2/3$  напряжения. Линейное напряжение  $U_{л} = \varphi_A - \varphi_B = U_{пит.}$ . В интервале времени  $T/6 - T/3$  в проводящем состоянии находятся тиристоры  $VS1, VS4$  и  $VS6$ . Приложенное к обмотке фазы  $A$  напряжение составляет  $2/3$  напряжения питания, к обмотке  $B$  –  $1/3$  напряжения. Линейное напряжение  $U_{л} = \varphi_A - \varphi_B = U_{пит.}$ . В интервале времени  $T/3 - T/2$  в проводящем состоянии находятся тиристоры  $VS1, VS3$  и  $VS6$ . Приложенное к обмоткам фаз  $A$  и  $B$  напряжение составляет  $1/3$  напряжения питания, а линейное напряжение  $U_{л} = \varphi_A - \varphi_B = 0$ . В интервале времени  $T/2 - 2T/3$  в проводящем состоянии находятся тиристоры  $VS2, VS3$  и  $VS6$ . Приложенное к обмотке фазы  $A$  напряжение составляет  $1/3$  напряжения питания, к обмотке  $B$  –  $2/3$  напряжения. Линейное напряжение  $U_{л} = \varphi_A - \varphi_B = -U_{пит.}$ . В интервале времени  $2T/3 - 5T/6$  в проводящем состоянии находятся тиристоры  $VS2, VS3$  и  $VS5$ . Приложенное к обмотке фазы  $A$  напряжение составляет  $2/3$  напряжения питания, к обмотке  $B$  –  $1/3$  напряжения. Линейное напряжение  $U_{л} = \varphi_A - \varphi_B = -U_{пит.}$ . В интервале времени  $5T/6 - T$  в проводящем состоянии находятся тиристоры  $VS2, VS4$  и  $VS5$ . Приложенное к обмоткам фаз  $A$  и  $B$  напряжение составляет  $1/3$  напряжения питания, а линейное напряжение  $U_{л} = \varphi_A - \varphi_B = 0$ . Далее процессы в схеме повторяются.

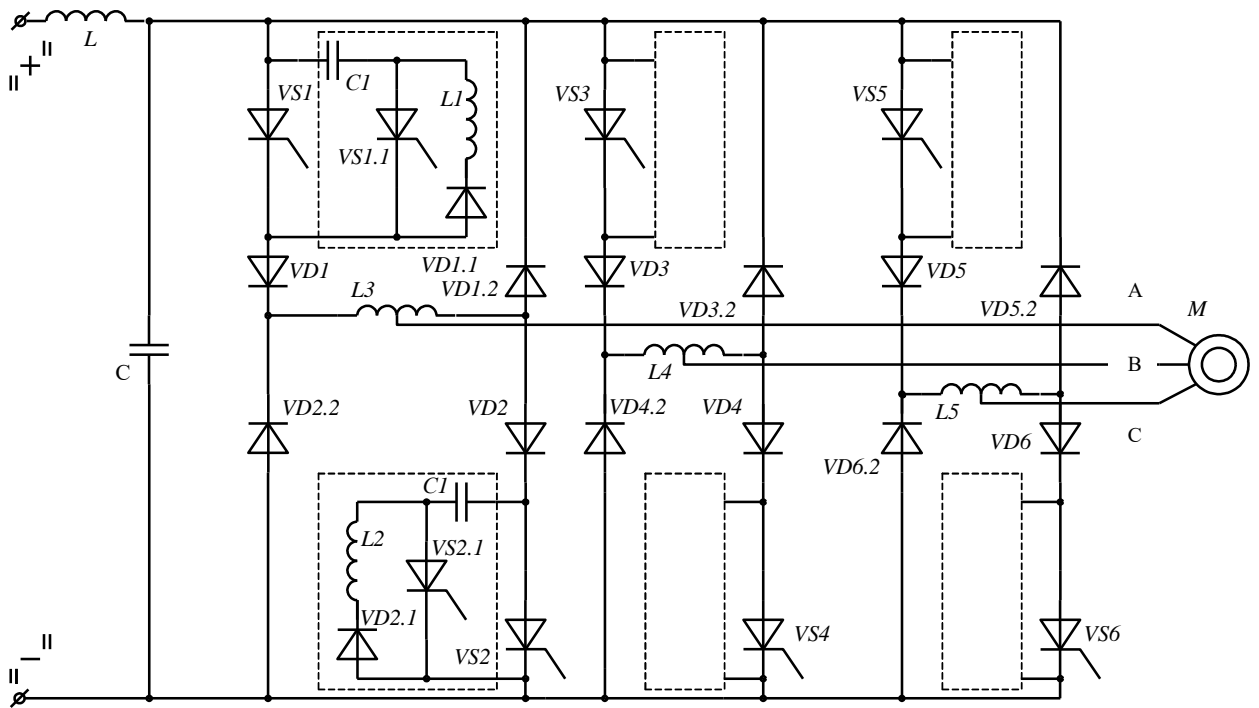


Рис. 15. Трёхфазный автономный инвертор со 180° системой управления

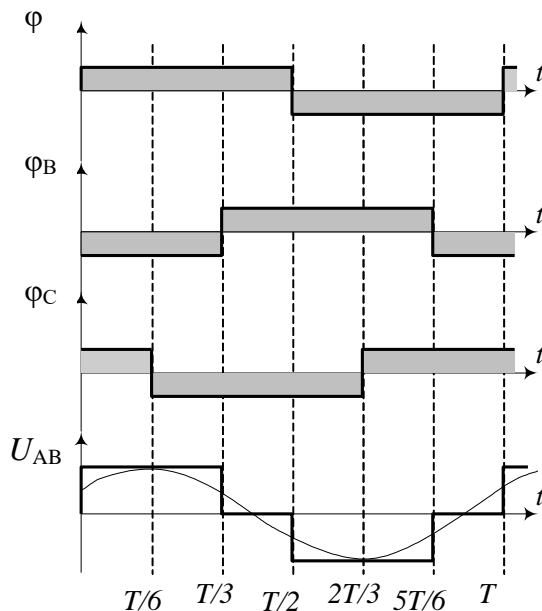


Рис. 16. Диаграммы инвертора с 180° схемой управления

Процесс инвертирования может быть совмещён с согласованием величины выходного напряжения с номинальным напряжением нагрузки, особенно в тех случаях, когда инвертирование применяется как промежуточная стадия преобразования электрической энергии в электрическую. В качестве примера рассмотрим схему электрических цепей однофазного преобразователя постоянно-постоянного тока со звеном переменного тока, которая особенно эффективна при работе на частотах свыше 10 кГц.

Повышенная частота позволяет использовать в инверторе резонансный контур, образованный первичной обмоткой трансформатора и конденсатором. Применение в цепи инвертора резонансного контура даёт возможность получения на выходе напряжения синусоидальной формы.

Принципиальная электрическая схема цепей преобразователя и диаграммы тока в резонансном контуре и выходного напряжения приведены на рис. 17.

Принцип работы преобразователя заключается в следующем. При замыкании ключей  $K1$  и  $K4$  по цепи «+» ИП – ключ  $K1$  – первичная обмотка трансформатора  $T$  с параллельно подключённым к ней конденсатором  $C$  – ключ  $K4$  – «-» ИП протекает ток, который из-за наличия в цепи резонансного

контура, имеет форму синусоиды. По достижении током нуля ключи  $K1$  и  $K4$  размыкаются,  $K2$  и  $K3$  замыкаются. При этом образуется цепь «+» ИП – ключ  $K3$  – первичная обмотка трансформатора  $T$  с параллельно подключённым к ней конденсатором  $C$  – ключ  $K2$  – «-» ИП, по которой также протекает синусоидальная полуволна тока, перемещающая сердечник трансформатора. После спада тока до нуля вновь размыкаются ключи  $K2$  и  $K3$ , а ключи  $K1$  и  $K4$  замыкаются. Далее процессы в схеме повторяются. Снимаемое с вторичной обмотки трансформатора напряжение после выпрямления диодным мостом приобретает вид, приведённый на диаграмме.

#### Регуляторы постоянно-постоянного тока.

Принцип работы регуляторов основан на дозировании подачи электрической энергии от источника потребителю, при котором потребитель временно подключается к источнику, а затем – отключается. Время, в течение которого потребляется энергия, называется временем импульса  $t_{и}$ , а время отключенного состояния – время паузы  $t_{п}$ . По истечении времени паузы потребитель вновь подключается на время импульса к источнику. Существуют следующие способы регулирования подводимой к потребителю энергии:

- изменением времени паузы при постоянстве времени импульса (частотное регулирование);
- изменением времени импульса при постоянстве периода регулирования (широтное регулирование);

– комбинированный.

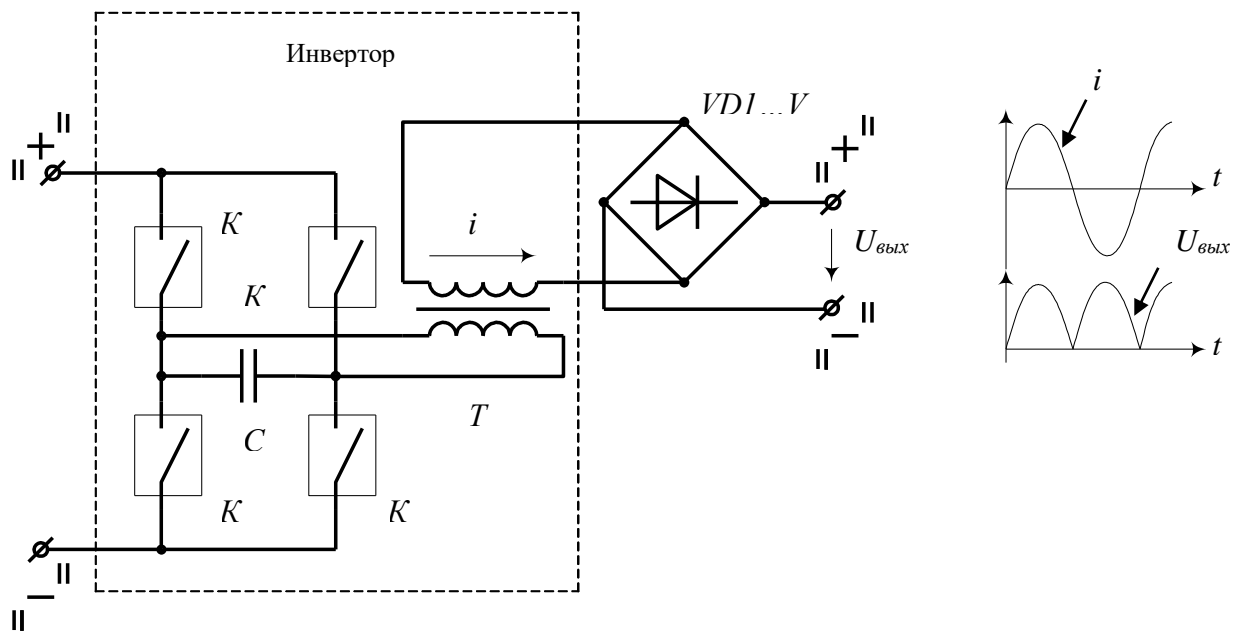


Рис. 17. Принципиальная схема цепей преобразователя и диаграммы тока и напряжения

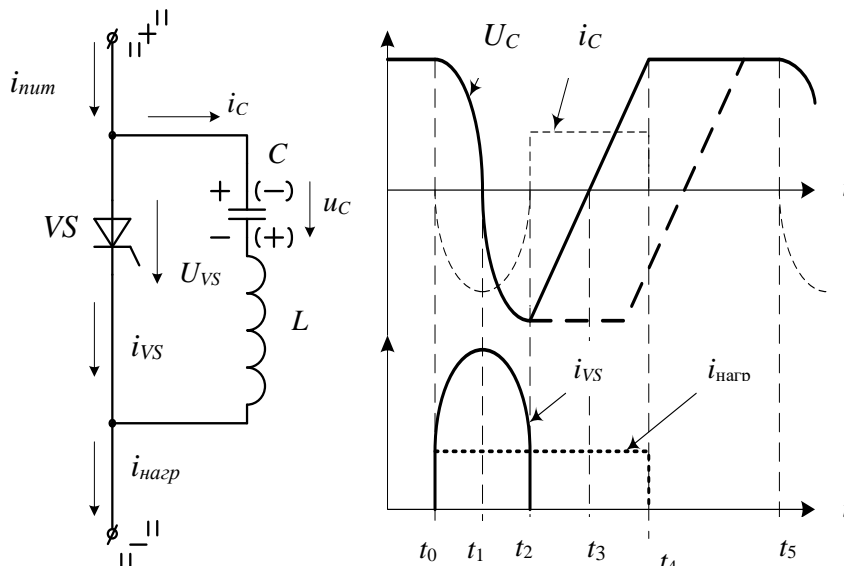


Рис. 18. Частотно-импульсный регулятор постоянного тока

Рассмотрим в качестве примера принцип работы электронного регулятора постоянного тока на базе SCR-тиристора, запираение которого осуществляется при помощи емкостного накопителя энергии (см. рис. 49). Принцип работы ключа заключается в следующем.

При подключении к источнику питания по цепи “+” (ИП)–  $C$  –  $L$  – “-” ИП протекает ток  $i_{пит}=i_C=i_{нагр}$ , заряжающий конденсатор  $C$  до напряжения источника питания с полярностью, указанной без скобок. После завершения процесса заряда ключ готов к работе. При отпирании тиристора  $VS$  в момент времени  $t_0$  образуется цепь питания нагрузки и через тиристор протекает ток  $i_{пит}=i_{нагр}$ . Одновременно образуется цепь разряда конденсатора  $C$ . Ток конденсатора  $i_C$ , протекая по цепи “+” обкладка конденсатора  $C$  – тиристор  $VS$  – дроссель  $L$  – “-” обкладка конденсатора  $C$ , сначала разряжает последний до нуля (момент времени  $t_1$ ), а затем перезаряжает до противоположной полярности (момент времени  $t_2$ ), указанной на рисунке в скобках. После перезаряда  $i_C$  становится равным 0 и к тиристорному прикладывается напряжение обратной полярности, что приводит к его выключению. Ток нагрузки, ранее протекавший через тиристор, коммутируется в цепь конденсатора  $C$  ( $i_{нагр}=i_C$ ), что приводит сначала к обнулению напряжения на конденсаторе (момент времени  $t_3$ ), а затем – к заряду до напряжения источника питания с полярностью, указанной без скобок (момент времени  $t_4$ ). Интервал времени от  $t_0$  до  $t_4$  называется временем импульса  $t_{ин}$ . После этого ключ готов к повторному циклу.

Приведенная схема обеспечивает постоянство времени проводящего состояния тиристора ключа, т. е. соответствует частотному способу регулирования. Изменения времени проводящего состояния ключа можно добиться путем запрета выключения тиристора после перезаряда коммутирующего конденсатора. Достичь этого можно схемным решением, пример которого приведен на рис. 19.

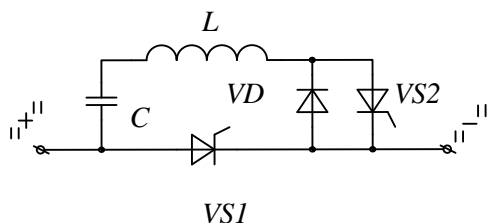


Рис. 19. Широтно-импульсный регулятор постоянного тока

После перезаряда коммутирующего конденсатора до противоположной полярности (момент времени  $t_3$  на рис. 49) разряд его через цепь нагрузки становится возможным только после того, как произойдет отпирание тиристора VS2 (гасящего). Длительность задержки на включение гасящего тиристора не должна превышать интервала времени  $\Delta t = t_5 - t_4$ , называемого временем паузы  $t_{пауз}$ . На рис. 44 пунктирной линией показано изменение диаграммы напряжения на коммутирующем конденсаторе для некоторого времени задержки  $t_{зад1}$ . Соответственно изменяются диаграммы  $i_C = f(t)$  и  $i_{нагр} = \varphi(t)$ .

Приведенная схема обеспечивает изменение времени проводящего состояния тиристора VS1 ключа (ширины импульса) при сохранении периода, т. е. соответствует широтному способу регулирования. Это же схемное решение ключа позволяет осуществлять и комбинированное регулирование (путем изменения, как ширины импульса  $t_{ин}$ , так и периода  $T_p$ ).

### Трансформаторы.

Наличие большого количества потребителей электрической энергии на переменном токе, рассчитанных на питание от источников с разным уровнем напряжения, привело к необходимости согласования питающего напряжения с напряжением потребителя. В качестве согласующего устройства между источником и потребителем выступают преобразователи уровня питающего напряжения – трансформаторы. Наибольшее распространение в быту получили однофазные трансформаторы, на производстве – многофазные (в подавляющем большинстве – трёхфазные).

Конструктивно трансформаторы выполняются в виде сердечника из магнитного материала, на котором размещаются обмотки: первичные (как правило, одна) и вторичные (как правило, несколько). В качестве примера на рис. 11...13 приведены принципиальные электрические схемы одно- и трехфазного трансформаторов. Принцип работы трансформаторов независимо от количества фаз заключается в следующем. При подаче на первичную обмотку трансформатора питающего напряжения в ней начинает протекать ток, создающий магнитное поле в сердечнике. Переменное магнитное поле наводит во вторичной обмотке трансформатора ЭДС, величина которой зависит от параметров первичной и вторичной обмоток (от количества витков в них). При подключении к вторичной обмотке

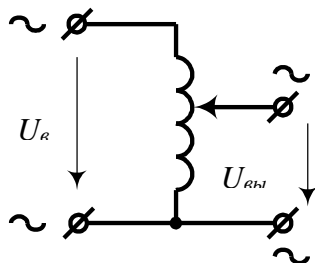


Рис. 20.

потребителя величина приложенного к нему напряжения  $U_2$  связана с величиной питающего напряжения  $U_1$  соотношением  $U_2 = U_1 w_2 / w_1$ . Поскольку прикладываемое к первичной обмотке напряжение – переменное, то протекающий по ней ток при положительной полуволне создаёт в сердечнике магнитный поток одного направления, а при отрицательной полуволне – противоположного. Изменение потока в сердечнике по величине и направлению приводит к изменению величины и полярности наводимой во вторичной обмотке ЭДС.

Помимо согласования напряжений источника питания и нагрузки трансформатор обеспечивает и гальваническую развязку цепей, что очень важно для обеспечения безопасной работы персонала многих

электротехнических установок.

Одной из разновидностей трансформаторов, позволяющей при постоянной величине питающего напряжения получать на выходе дискретно меняющееся выходное, является автотрансформатор. Условное графическое обозначение автотрансформатора приведено на рис. 20.

### Трансформаторные преобразователи числа фаз.

В некоторых случаях преобразование электрической энергии переменного тока связано не только с согласованием источника и потребителя по уровню напряжения, но и с изменением количества фаз. В настоящее время известно несколько схемных решений преобразователей подобного рода. В качестве примера рассмотрим принцип преобразования двухфазного ортогонального напряжения в трехфазное на базе двух трансформаторов, приведённую на рис. 21 (схема Ч.Ф.Скотта).

Принцип преобразования поясняется векторными диаграммами, приведёнными на этом же рисунке. Преобразователь выполнен на двух трансформаторах, каждый из которых содержит первичную и вторичную обмотки. Отличия трансформаторов заключаются в том, что у трансформатора T1 вторичная обмотка имеет отвод от середины (точка D), а сами обмотки имеют разное количество витков. При этом  $w_A = w_B$ . Ортогональность питающих напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , показанная на рисунке в координатных осях (“+j” – “+1”), обеспечивает ортогональность выходных напряжений  $U_{AB}$  и  $U_{CD}$ . Отложенные на вещественной оси векторы напряжений  $U_{BD}$  и  $U_{DA}$  вторичных полуобмоток  $w_A$  и  $w_B$  трансформатора T1 образуют с восстановленным из точки D вектором напряжения  $U_{CD}$  вторичной обмотки трансформатора T2

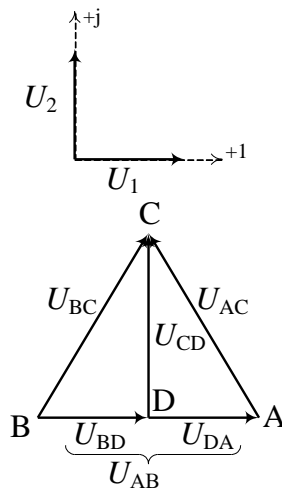
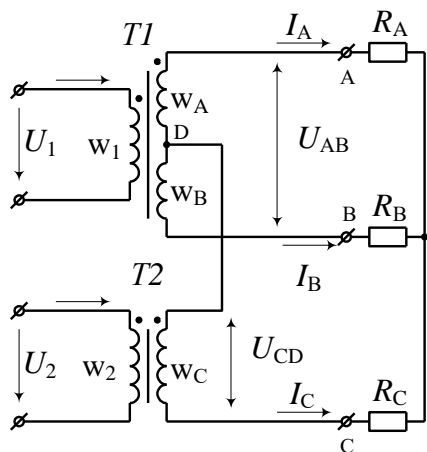


Рис. 21. Схема преобразователя Скотта

приведена на рис. 22.

Принцип преобразования поясняется векторными диаграммами, приведёнными на этом же рисунке. Отличительной особенностью трансформатора является то, что формирование напряжения  $U_1$  осуществляется при помощи двух обмоток  $w_1$ , расположенных на стержнях фаз А и С трансформатора, а

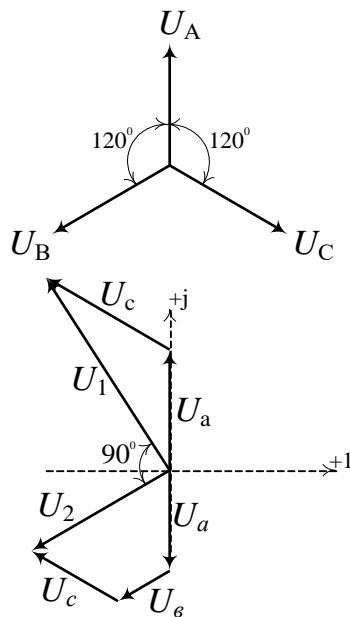
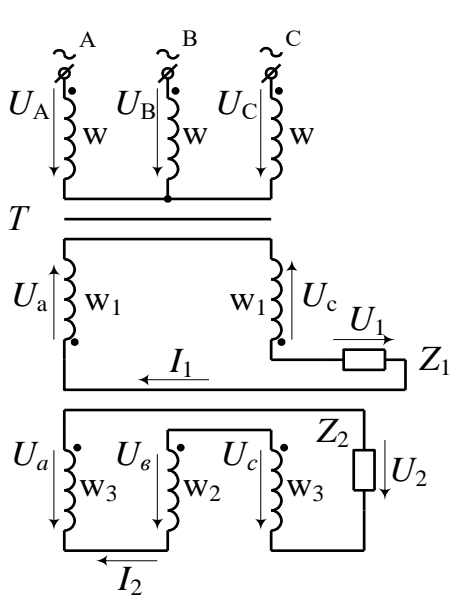


Рис. 22. Схема преобразователя Леблана

напряжений на нагрузках  $Z_1$  и  $Z_2$ , что и определяет направление токов в соответствующих контурах. Проставленные на рисунке направления напряжений на обмотках  $w_1 \dots w_3$  определены, исходя из следующих соображений: направление наводимого во вторичной обмотке напряжения совпадает с направлением напряжения, приложенного к первичной обмотке (от начала к концу). Построение вектора  $U_1$  начинается с нанесения вектора  $U_a$  на ось ординат в координатных осях (“+j” – “+1”). Поскольку направления напряжения и тока в обмотке  $w_1$  фазы А совпадают также, как и в обмотке  $w$  первичной цепи, то направление вектора  $U_a$  совпадает с направлением вектора  $U_A$ . В обмотке  $w_1$  фазы С направления напряжения и тока противоположны. Поэтому направление вектора  $U_c$  – противоположно по отношению к вектору  $U_C$ . Начало вектора  $U_c$  совпадает с концом вектора  $U_a$ . Начало координат и конец вектора  $U_c$  образуют вектор напряжения  $U_1$ .

Аналогично определяется направление и длина вектора  $U_2$ . При этом направления векторов  $U_a$  и  $U_c$  противоположны направлениям векторов  $U_A$  и  $U_C$ , а направление вектора  $U_e$  совпадает с направлением вектора  $U_B$ .

### Трансформаторные преобразователи частоты.

треугольник напряжений ABC. Подбором количества витков вторичных обмоток трансформаторов можно добиться равенства длин векторов линейных напряжений  $U_{AB}$ ,  $U_{AC}$  и  $U_{BC}$ . Подключенная к выходным клеммам А,В,С преобразователя нагрузка образует трехфазную цепь

Преобразователь обладает свойством обратимости, т.е. при питании его трехфазным напряжением со стороны нагрузки на входе получается два однофазных источника напряжения со сдвигом по фазе в  $90^0$  эл.

Преобразования трёхфазного напряжения в двухфазное можно добиться и на одном трансформаторе. Принципиальная электрическая схема цепей ТПЧФ, разработанная Лебланом,

напряжения  $U_2$  – на стержнях всех трёх фаз. При этом обмотки стержней фаз А и С имеют одинаковое количество витков ( $w_3$ ), а стержня фазы В –  $w_2 \neq w_3$ .

Кроме того, начала и концы всех обмоток для формирования ортогональности векторов напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , соединяются так, как это показано на рисунке.

Для построения векторов напряжений  $U_1$  и  $U_2$  следует задаться направлением векторов первичных фазных напряжений, что и показано на верхней диаграмме. При этом полагалось, что направления напряжений и токов в первичных обмотках преобразователя совпадают. Зададимся падением



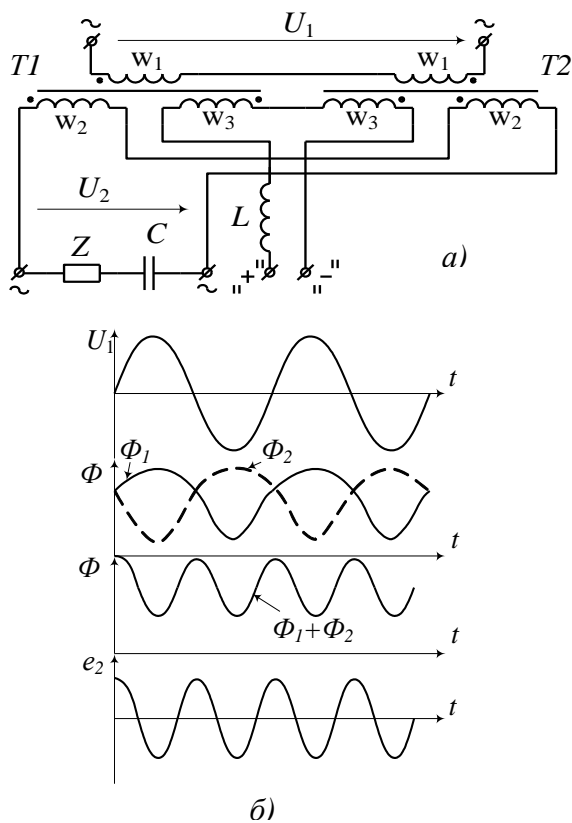


Рис. 23. Схема удвоителя частоты на трансформаторах

уравновешивающая прикладываемое к ним напряжение  $U_1$ , создается разностью потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Эта разность изменяется с частотой  $f_1$  питающего напряжения и не содержит чётных гармоник. Результирующая ЭДС, индуцированная в соединённых согласно вторичных обмотках, создается суммой потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , которая не содержит нечётных гармоник. Поэтому результирующая ЭДС и выходное напряжение  $U_2$  определяются в основном второй гармоникой потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , т.е. изменяются с удвоенной частотой  $f_2=2f_1$ . Амплитуду выходного напряжения  $U_2$  можно регулировать, изменяя силу тока подмагничивания. Для того, чтобы по обмоткам подмагничивания не протекали переменные токи, созданные чётными гармониками ЭДС, в цепь их питания включается дроссель  $L$ . Нечётные гармоники ЭДС компенсируются в них благодаря согласному включению обмоток. Для компенсации падения напряжения во вторичных обмотках последовательно с нагрузкой включается конденсатор  $C$ .

Принцип работы преобразователей для утроения частоты питающего напряжения на нагрузке, выполненных на базе трансформаторов, основан на использовании третьей гармоники, возникающей при насыщении сердечников трансформаторов, подключённых к трёхфазной сети.

На рис. 24а приведена принципиальная электрическая схема трёхфазного трансформаторного преобразователя для утроения частоты, подключение нагрузки ко вторичным обмоткам которого осуществляется по схеме «разомкнутый треугольник».

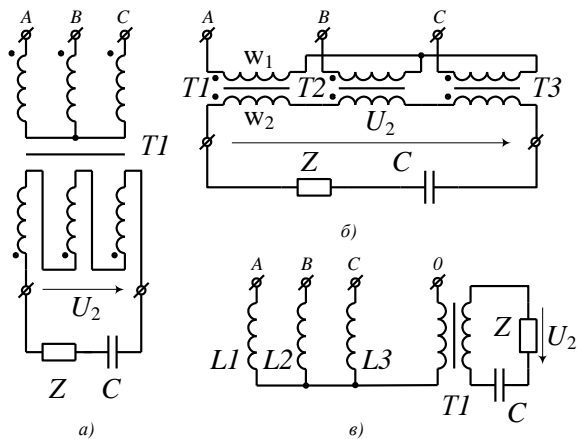


Рис. 24. Схемы утроителей частоты на трансформаторах

Принципиальная электрическая схема цепей преобразователя для удвоения частоты на базе трансформаторов приведена на рис. 23а. Преобразователь выполнен на двух однофазных трансформаторах, каждый из которых имеет три обмотки – первичную  $w_1$ , вторичную  $w_2$  и подмагничивающую  $w_3$ . Первичные обмотки этих трансформаторов включены встречно, а вторичные и подмагничивающие – согласно. Поэтому в течение первого полупериода питающего напряжения  $U_1$  в одном из трансформаторов действует сумма магнитодвижущих сил (МДС), создаваемых подмагничивающей ( $F_{пм}$ ) и первичной ( $F_{\mu}$ ) обмотками. В течение второго полупериода питающего напряжения  $U_1$  МДС  $F_{\mu}$  изменяет направление и теперь уже в другом трансформаторе действует суммарная МДС.

На диаграммах, приведённых на рис. 23б показаны кривые, соответствующие состоянию намагничивания в первом полупериоде трансформатора  $T1$ . В результате действия суммарной МДС кривая потока  $\Phi_1$  приобретает уплощённую форму, а в трансформаторе  $T2$  – поток существенно уменьшается в кривой  $\Phi_2$  образуется провал. Во втором полупериоде формы кривых потоков в трансформаторах меняются. Таким образом, кривые потоков обоих трансформаторов имеют несимметричную форму, а следовательно, содержат как чётные, так и нечётные гармоники.

При встречном включении первичных обмоток индуцируемая в них результирующая ЭДС  $e_1$ , создаётся разностью потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Эта разность изменяется с частотой  $f_1$  питающего напряжения и не содержит чётных гармоник. Результирующая ЭДС, индуцированная в соединённых согласно вторичных обмотках, создается суммой потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , которая не содержит нечётных гармоник. Поэтому результирующая ЭДС и выходное напряжение  $U_2$  определяются в основном второй гармоникой потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , т.е. изменяются с удвоенной частотой  $f_2=2f_1$ . Амплитуду выходного напряжения  $U_2$  можно регулировать, изменяя силу тока подмагничивания. Для того, чтобы по обмоткам подмагничивания не протекали переменные токи, созданные чётными гармониками ЭДС, в цепь их питания включается дроссель  $L$ . Нечётные гармоники ЭДС компенсируются в них благодаря согласному включению обмоток. Для компенсации падения напряжения во вторичных обмотках последовательно с нагрузкой включается конденсатор  $C$ .

Тот же результат получается при использовании трёх однофазных трансформаторов (см. рис. 24б) или одного однофазного трансформатора и трёх дросселей с насыщающимися сердечниками, соединёнными по схеме рис. 24в. Ток в каждом из дросселей преобразователя, выполненного по последней схеме, несинусоидален и содержит значительную по величине третью гармонику. В нулевой точке сумма токов питающей частоты равна нулю, а токи утроенной частоты, протекающие по первичной обмотке

трансформатора складываются. Поэтому во вторичной обмотке трансформатора индуцируется ЭДС тройной частоты. Для компенсации падения напряжения в трансформаторе из-за утроенной частоты в цепи нагрузки включается конденсатор  $C$ .

### Электромашинные преобразователи.

Электромашинные преобразователи предназначены для преобразования переменного тока в постоянный и наоборот, изменения величины напряжения, частоты, числа фаз и т.д. Несмотря на активное внедрение статических полупроводниковых преобразователей, позволяющих заменить вращающиеся, роль последних ещё довольно велика, а в некоторых случаях – исключительна.

Конструктивно преобразователи выполняются в виде электрической машины, на общем валу которой размещаются, например, ротор трёхфазного асинхронного двигателя (см. рис. 25) и якорь генератора постоянного тока (см. рис. 26). Поле каждой из электрических машин создаётся своей магнитной системой, для чего в корпусе над ротором (статоре) асинхронного мотора в пазах укладываются трёхфазные обмотки, а над якорем генератора постоянного тока – полюсы с размещёнными на них обмотками возбуждения.

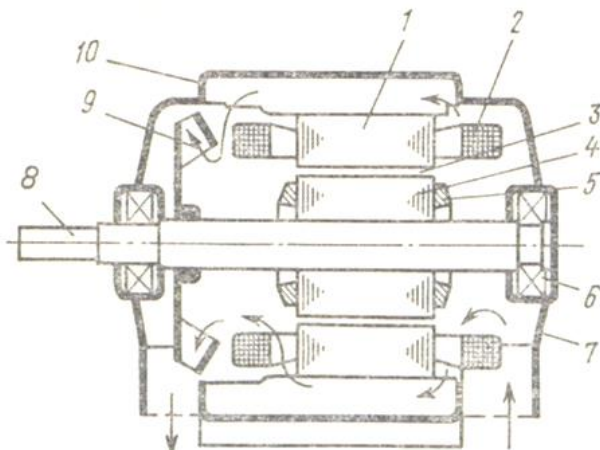


Рис. 25. Машина переменного тока  
1 – статор; 2 – обмотка статора; 3 – зазор; 4 – ротор; 5 – обмотка ротора; 6 – подшипники; 7 – щиты подшипниковые; 8 – вал; 9 – вентилятор; 10 – станина

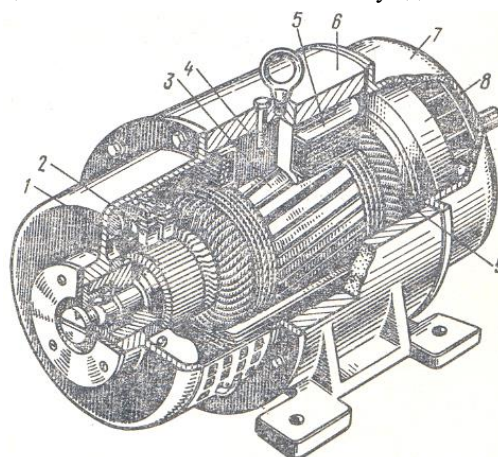


Рис. 26. Машина постоянного тока  
1 – коллектор; 2 – щётки; 3 – сердечник якоря; 4 – главный полюс; 5 – катушка обмотки возбуждения; 6 – станина; 7 – подшипниковый щит; 8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря

Структурная и принципиальная электрическая схемы электромашинного преобразователя трёхфазного переменного тока в постоянный приведены на рис. 27а) и б) соответственно. Принцип работы преобразователя заключается в следующем. При подаче питания от трёхфазной сети переменного тока на асинхронный двигатель вал преобразователя начинает вращаться. Если обмотку возбуждения  $L$  генератора  $G$  запитать постоянным током, то на зажимах его якорной обмотки появится ЭДС. При подключении к выходным зажимам нагрузки по цепи генератор – нагрузка потечёт ток, сила которого зависит от величины напряжения на зажимах, которая регулируется величиной тока в обмотке возбуждения генератора.

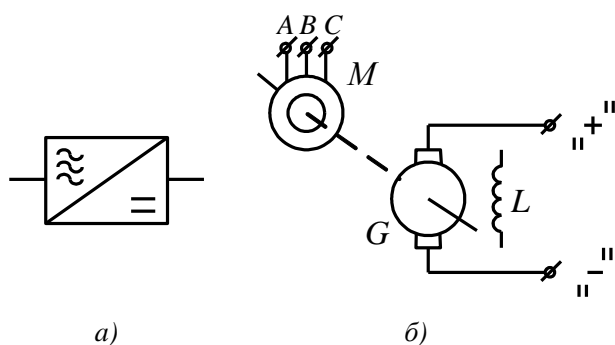
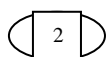


Рис. 27. Схема электромашинного преобразователя

Преобразователь обладает свойством обратимости. Если якорную обмотку генератора запитать от источника постоянного тока при сохранении поля машины (т. е. использовать генератор в качестве мотора), то на зажимах асинхронной машины появится переменное напряжение.

Аналогичным образом устроены электромашинные преобразователи частоты, фаз и др.



Основой для проведения инженерных расчётов преобразователей являются диаграммы мгновенных значений токов и напряжений на элементах схем. Для всех рассмотренных схем расчёт сводится к выбору элементной базы (тиристоров, диодов, дросселей, конденсаторов) из перечня серийно выпускаемых, которые выдерживают прикладываемые к ним напряжения и протекающие через них токи во всём диапазоне рабочих частот преобразователей.

При выборе типа силового полупроводникового прибора (СПП) преобразователя необходимо определить величину максимально допустимого тока нагрузки, не вызывающего повышения температуры перехода выше допустимого значения.

Расчет температуры перехода производится по известным значениям потерь и теплового сопротивления и заключается в следующем. Реально действующие в СПП импульсы потерь энергии произвольной формы (см. рис. 13) заменяются на эквивалентные импульсы прямоугольной формы с амплитудой, равной по величине максимальной величине реального импульса, при сохранении длительности периода регулирования  $T_p$ . Полученная в результате преобразования последовательность импульсов отображает условный режим работы СПП, который может сводиться к кратковременному, повторно-кратковременному или длительному. Для каждого из этих режимов получены интегральные выражения, позволяющие с инженерной точностью рассчитать максимально допустимую величину тока нагрузки  $I_{нагр}$ , протекающего через прибор. В частности, для повторно-кратковременного режима работы тиристора расчетная формула

$$I_{VS} = \sqrt{\frac{U_{VS}^2}{4r_{VS}^2} + \frac{\{[T_{дон}] - T_a\}T_p}{r_{VS}t_u R_T}} - \frac{U_{VS}}{r_{VS}},$$

где  $U_{VS}$  - пороговое напряжение тиристора,  $r_{VS}$  - дифференциальное сопротивление тиристора,  $[T_{дон}]$  - допустимая температура  $p$ - $n$ -перехода,  $T_a$  - температура окружающей среды,  $T_p$  - период регулирования,  $t_u$  - время импульса,  $R_T$  - переходное сопротивление  $p$ - $n$ -переход тиристора - окружающая среда.

Тиристор выбирается по рассчитанному значению тока. Класс тиристора определяется по максимальному значению приложенного к нему напряжения прямого напряжения в закрытом состоянии с учетом того, что рабочее напряжение на нем определяется как

$$U_{раб} = k_{зан} U_{кл} = (0,7 \dots 0,8) U_{кл}.$$

Аналогично рассчитываются параметры диодов и симисторов.

Одним из основных условий нормальной работы тиристора является обеспечение ограничений по скорости нарастания токов  $di/dt$  и напряжений  $du/dt$  и времени его выключения  $t_{выкл}$ . Последнее, как упоминалось ранее, приводится в справочных данных на тиристор. Как правило, это время обеспечивается схемным решением цепей аппарата и принимается на 10...20% большим по сравнению с паспортным. В преобразователях с узлами принудительной емкостной коммутации тиристорах схемное время  $t_{сх}$  определяется периодом разряда конденсатора от первоначальной величины напряжения до 0 (см., например, на рис. 10 временной интервал  $t_4 - t_5$ ). Поэтому в расчетах необходимо принимать  $t_{сх} = (1,1 \dots 1,2) t_{выкл}$ .

Схемное время в преобразователях с принудительной емкостной коммутацией определяется при прочих равных условиях

величиной емкости конденсатора, которая достаточно просто может быть определена, например, для варианта схемного решения, приведенного на рис. 10, при допущении постоянства величины тока нагрузки как

$$C = I_{нагр} t_{сх} / U_{num}.$$

Величина индуктивности  $L$  дросселя контура коммутации может быть определена из условия ограничения амплитуды разрядного тока  $i_C$  конденсатора значением  $I_{Cмакс} = I_{нагр} - I_{VS}$ . Тогда

$$L = C \frac{U_{num}^2}{(I_{Cмакс} - I_{VS})^2}.$$

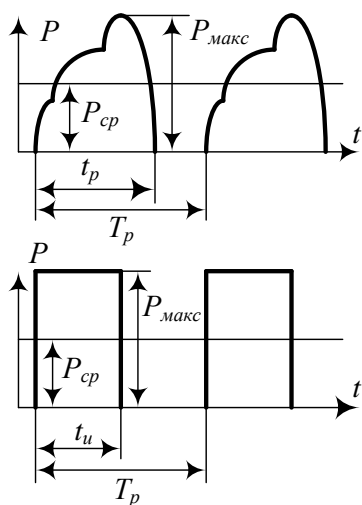


Рис. 13