

## **Раздел 7. Системы управления ведомыми вентильными преобразователями.**

### *Лекция №17. Принципы фазового управления вентильными преобразователями*

#### **17.1. Функции и структура систем управления вентильными преобразователями.**

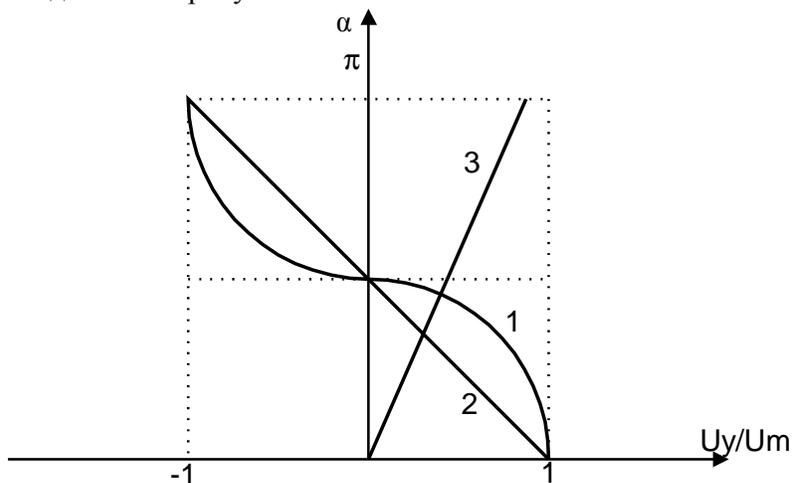
Вентильные преобразователи состоят из силовой части и системы управления. Силовая часть вентильного преобразователя, включающая в себя управляемые вентили (тиристоры и мощные транзисторы), может функционировать только при подаче в определённые моменты времени импульсов на управляющие электроды силовых вентилях. Показатели системы управления определяют технико-экономические параметры вентильных преобразователей в той же мере, что и показатели силовой схемы.

Системы управления представляют собой развитые информационные устройства, выполняющие различные функции в зависимости от типа преобразователя и области его применения. Однако эти функции могут быть сведены к обобщённому перечню, поскольку в конечном счёте главной задачей работы системы управления является формирование сигналов, обеспечивающих включение и выключение силовых вентилях. В вентильных преобразователях с естественной коммутацией выключение вентилях осуществляется за счёт изменения полярности напряжения питающей сети и спада тока через вентиль к нулю. Поэтому система управления осуществляет только включение вентилях (однооперационных тиристоров). В системах управления с принудительной коммутацией система управления обеспечивает выключение силовых вентилях в определённые моменты времени: это осуществляется либо путём воздействия на управляющий электрод полностью управляемого вентиля (транзистора или двухоперационного тиристора), либо путём включения вспомогательных вентилях контура принудительной коммутации однооперационных тиристоров. Наибольшее распространение среди зависимых вентильных преобразователей (выпрямителей, зависимых инверторов, регулируемых преобразователей переменного напряжения, непосредственных преобразователей частоты) получили преобразователи с естественной коммутацией вентилях, силовая часть которых выполнена на однооперационных тиристорах. Далее рассматриваются системы управления с зависимыми вентильными преобразователями с естественной коммутацией (системы импульсно-фазового управления - СИФУ).

Итак, функции систем управления такими преобразователями могут быть сведены к формированию в определённые моменты времени управляющих импульсов на определённом вентиле. Эта задача может быть разделена на две задачи:

1. Определение моментов времени, в которые должны быть включены определённые вентили. Эти моменты времени задаются некоторым управляющим сигналом, который определяет работу вентильного преобразователя (этот сигнал называют также ведущим, задающим, иногда эталонным сигналом). Управляющий сигнал определяет величину выходного параметра преобразователя (например, среднее значение выходного напряжения или тока выпрямителя). Поскольку решение первой задачи в зависимых преобразователях связано с определённым моментом включения вентиля, подключенного к напряжению питающей сети, то момент включения должен быть увязан с текущим значением фазы питающей сети, т.е. система управления задает угол управления – фазовую задержку управляющего импульса на  $i$ -й вентиль относительно момента естественной коммутации  $i$ -ого вентиля, т.е. момент отпирания  $i$ -ого вентиля в диодном режиме, когда отпирание происходит в момент появления положительного напряжения на аноде вентиля. Таким образом, первая задача является задачей информационной и сводится к преобразованию управляющего сигнала (например, тока входа) во временную величину – угол управления  $\alpha$ .

Это преобразование математически описывается фазовой характеристикой  $\alpha=f(U_y)$ , где  $U_y$  – управляющий сигнал. При выполнении системы управления стремятся к тому, чтобы фазовая характеристика была однозначной. Распространение получили фазовые характеристики, приведенные на рисунке 17.1.



- 1 –  $\alpha=\arccos(U_y/U_m)$ .
- 2 –  $\alpha=\pi/2 - \pi/2 \cdot U_y/U_m$ .
- 3 –  $\alpha=\pi U_y/U_m$ .

Рис. 17.1. Фазовые характеристики системы управления при различных законах управления.

Следует отметить, что преобразование управляющего сигнала в угол управления является импульсным преобразованием: непрерывная величина  $U_y$  преобразуется в функцию  $\alpha$ , которая является решетчатой функцией, поскольку за период питающей сети каждый вентиль может быть включен только один раз, что показано во временных диаграммах 17.2.

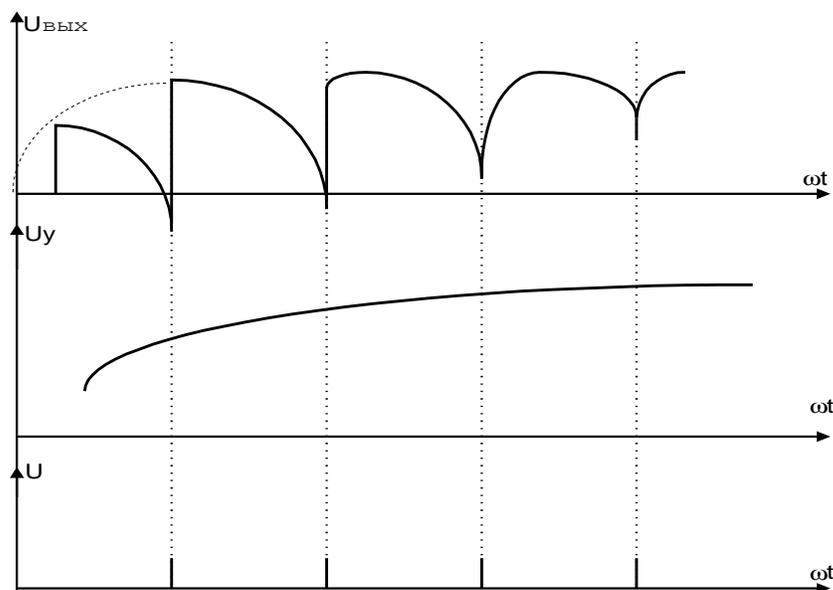


Рис. 17.2. Временные диаграммы работы системы управления выпрямителем.

2. Вторая задача, решаемая системами управления – это, собственно, формирование управляющих импульсов, т.е. создание управляющих сигналов, передаваемых на управляющие электроды вентиля, достаточной амплитуды, мощности, длительности, выработка сигналов определенной формы. Это функция систем управления является энергетической.

Помимо этого, системы управления вентильными преобразователями могут выполнять некоторые другие функции: осуществление пуска и остановки агрегатов, осуществление защиты преобразователей от аварийных режимов, и т.п., однако реализация этих функций также сводится к определению моментов подачи на управляющие электроды силовых вентилях управляющих импульсов, либо к запрету формирования управляющих импульсов (остановка агрегата, срабатывание защиты).

Итак, входным сигналом системы управления является управляющий сигнал. На выходе системы управления формируются управляющие импульсы, подаваемые на управляющие электроды силовых вентилях. В соответствии с перечисленными двумя задачами, выполняемыми системами управления функциональная схема систем управления (рисунок 17.3.) включает в себя преобразователь управляющего сигнала во временной интервал, называемый фазосмещающим устройством (ФСУ) и систему выходных формирователей (ВФ), на вход которых поступают команды с выходов ФСУ, по которым осуществляется формирование управляющих импульсов, требуемой формы, длительности и мощности. Управляющий сигнал вырабатывается генератором управляющего сигнала (ГУС).

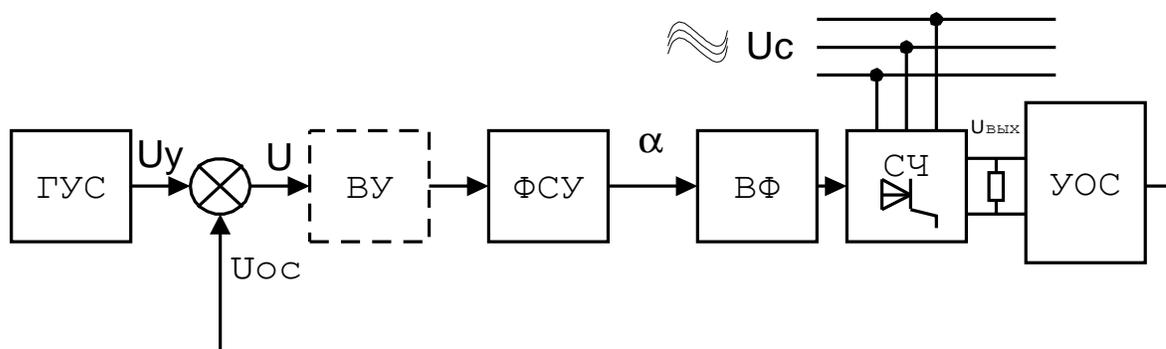


Рис. 17.3. Обобщённая структурная схема системы управления.

Помимо этих основных блоков система управления может включать в себя входное устройство (ВУ), которое преобразует сигнал ГУС к форме, обеспечивающей оптимальное функционирование ФСУ (например, преобразование управляющего напряжения в ток, управляющего кода в напряжение и т.п.). Кроме того, ВУ может осуществлять нелинейные преобразования управляющего сигнала (ограничения, нелинейные преобразование с целью улучшения формы фазовой характеристики и т.п.). Система управления может включать устройство обратной связи (УОС), на вход которого поступает выходной параметр вентильного преобразователя (информация о напряжении, токе, гармоническом составе выходного напряжения и т.п.). Выходное напряжение УОС  $U_{ос}$  поступает на вход системы управления в виде сигналов ООС, что позволяет стабилизировать выходные параметры вентильного преобразователя. В этом случае на вход ВУ (или непосредственно ФСУ) поступает сигнал  $U = U_y - U_{ос}$ . Вентильные преобразователи, имеющие контур ОС, охватывающий силовую часть преобразователей, называются преобразователи с замкнутым контуром управления. При отсутствии контура ОС речь идет о разомкнутых системах управления.

Вентильный преобразователь, состоящий из силовой части и системы управления можно представить в виде передаточного звена (рисунок 17.4.), на вход которого подается управляющий сигнал, а с выхода снимается выходной параметр.

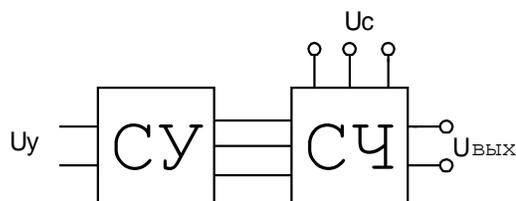
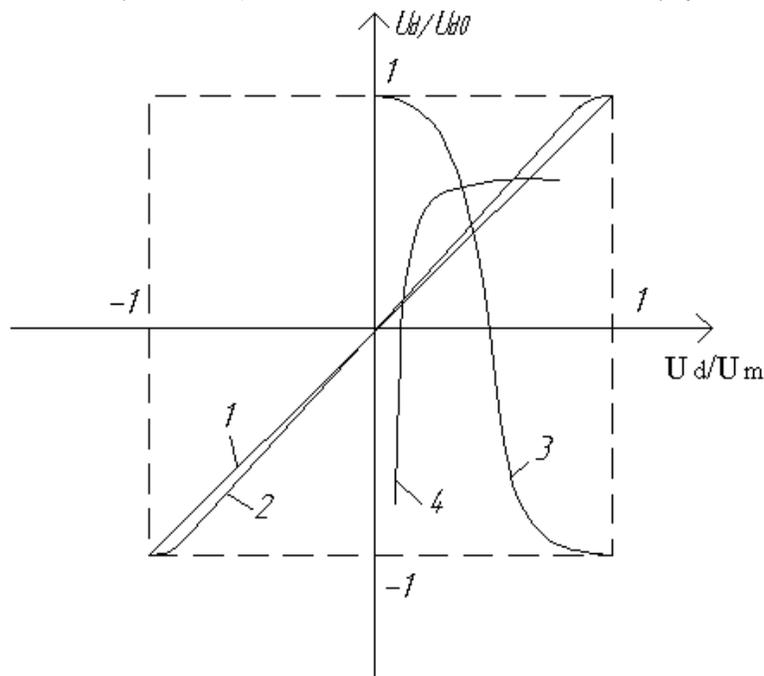


Рис. 17.4. Эквивалентная схема выпрямителя как объекта управления.

Данное передаточное звено описывается регулировочной характеристикой преобразователя. Если выходным параметром выпрямителя является напряжение  $U_d$ , то регулировочная характеристика имеет вид  $U_d = f(U_y)$ . При линейной зависимости  $U_d$  от  $U_y$  характеристика называется линейной. На рисунке 17.5. представлены регулировочные характеристики вентильного преобразователя. Регулировочная характеристика описывает весь преобразователь, состоящий из силовой части и системы управления.



*Рис.17.5. Регулировочные характеристики выпрямителя при различных законах управления.  
 1-при косинусоидальном опорном напряжении(17.1)  
 2-при линейнопадающем опорном напряжении(17.6.)  
 3-при линейнонарастающем опорном напряжении(17.8.)  
 4-горизонтальный способ управления(17.10)*

Поскольку выходные параметры преобразователя зависят не только от фазы управляющих импульсов, но и от формы и величины питающего напряжения, от коммутационных процессов, в вентильном преобразователе, от работы фильтрующих устройств, то регулировочная характеристика в большой степени от электромагнитных процессов в силовой части преобразователя.

Стабилизация регулировочной характеристики преобразователя, при воздействии на преобразователь множества факторов, может быть осуществлена только в вентильных преобразователях с замкнутым контуром управления.

Наиболее важной частью системы управления является фазосмещающее устройство (ФСУ), его свойства определяют важнейшие показатели системы управления. Поэтому, системы управления подразделяются в зависимости от принципов, положенных в основу работы ФСУ.

### 17.2. Способы построения синхронных фазосмещающих устройств.

ФСУ является преобразователем управляющего сигнала  $U_y$  в угол управления  $\alpha$ , отсчитываемый от момента естественного отпираания очередного вентиля. ФСУ, в который вводится информация о текущем значении фазы питающего напряжения, т.е. ФСУ, работа которого синхронизирована питающей сетью, называется синхронным ФСУ. Синхронные ФСУ могут применяться в замкнутых системах управления. В таком случае на вход ФСУ подается сигнал  $U=U_y-U_{oc}$ .

Существует ряд способов построения синхронных ФСУ. Наибольшее распространение получили ФСУ с развертывающим сигналом, которые часто называют ФСУ вертикального типа. ФСУ состоит из генератора развертывающего(опорного) напряжения(ГОН), работа которого синхронизируется напряжением питания сети, и схемы сравнения (компаратора) СС, на которые поступают опорное и управляющее напряжения. Структурная схема вертикального ФСУ приведена на рис. 17.6.

СС фиксирует равенство  $U_{оп}$  и  $U_y$ , в момент равенства переключается СС и вырабатывается управляющий импульс, передаваемый на управляющий электрод очередного вентиля. Фазовая характеристика ФСУ зависит от выбора формы опорного напряжения.

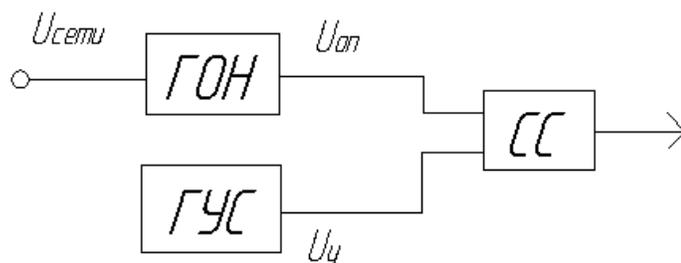


Рис.17.6. Структурная схема ФСУ вертикального типа

При косинусоидальной форме:

$$U_{оп}(t)=U_m \cos(\omega t), \quad (17.1.)$$

где  $\omega t=0$  – момент естественной коммутации  $i$ -го вентиля,

в момент  $\omega t=\alpha$  имеем:

$$U_m \cos \alpha = U_y \quad (17.2.)$$

Из уравнения (17.2.) можно получить фазовую характеристику ФСУ:

$$a = \arccos\left(\frac{U_y}{U_m}\right). \quad (17.3.)$$

Такая фазовая характеристика называется арккосинусной идеальной (рис.17.1. кривая 1). Идеализированный вентильный преобразователь, работающий от синусоидальной симметричной сети, при отсутствии коммутационных искажений выходного напряжения, в режиме непрерывного тока нагрузки характеризуется известным соотношением, также называемым регулировочной характеристикой:

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha. \quad (17.4.)$$

При подстановке выражения (17.3.) в уравнение (17.4.) получаем:

$$U_d = \frac{U_{d0}}{U_m} \cdot U_y. \quad (17.5.)$$

Следовательно, регулировочная характеристика  $U_d=f(U_y)$  вентильного преобразователя при косинусоидальном опорном напряжении, имеет линейный характер (рис.17.5. график 1). Опорное напряжение косинусоидальной формы, может быть сформировано из сетевого

напряжения. Для этого сетевое напряжение должно быть преобразовано фильтром, осуществляющим сдвиг по фазе, и подавление высших гармонических составляющих. Последнее необходимо, поскольку сетевое напряжение в сетях ограниченной мощности характеризуется сложным гармоническим составом.

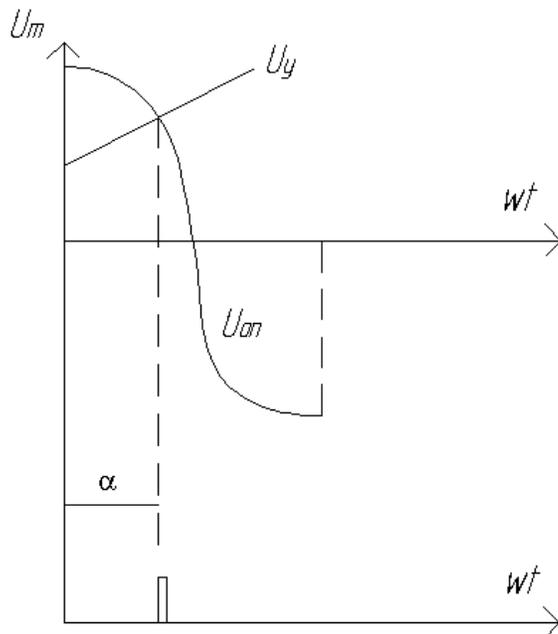


Рис.17.7. Временные диаграммы напряжений ФСУ вертикального типа

Фильтрация сетевого напряжения при сильных гармонических искажениях бывает некачественной, а фазовый сдвиг вносимый фильтром – нестабильным. Это приводит к большим погрешностям в работе ФСУ. В таких случаях применяют линейную форму опорного напряжения. ГОН выполняется в виде генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН), работа которого синхронизирована питающей сетью. Начало развертки осуществляется в момент естественной коммутации  $i$ -го вентиля. При линейно падающем опорном напряжении

$$U_{он}(t) = U_m \left(1 - \frac{2wt}{p}\right) \quad (17.6.)$$

фазовая характеристика имеет вид (рис.17.1. кривая 2),

$$a = \frac{p}{2} - \frac{p}{2} \cdot \frac{U_y}{U_m} \quad (17.7.)$$

т.е. является линейной фазовой характеристикой.

При подстановке (17.7.) в уравнение (17.4.) получаем регулировочную характеристику преобразователя  $U_d = f(U_y)$ , которая представлена (рис.17.5. кривая 2). Регулировочная характеристика имеет близкий к линейному характер. Свойства преобразователя с арккосинусной и линейной фазовой характеристиками очень близки.

Нередко используют и линейно нарастающее опорное напряжение

$$U_{он}(t) = U_m \frac{wt}{p} \quad (17.8.)$$

фазовая характеристика при этом (рис.17.1. кривая 3),

$$a = p \cdot \frac{U_y}{U_m} \quad (17.9.)$$

Регулировочная характеристика представлена на рис.17.5. график 3. Управляющее и выходное напряжения при этом также связаны зависимостью близкой к линейной. Линейная зависимость  $U_d = f(U_y)$  обуславливает хорошие свойства вентильного преобразователя, как элемента системы автоматического управления.

Таким образом реализация вертикального способа управления позволяет добиться линейности регулировочных характеристик вентильного преобразователя. Вторым достоинством способа является достижение максимального быстродействия, поскольку управляющий сигнал подается на схемы сравнения без усреднения и запаздывания.

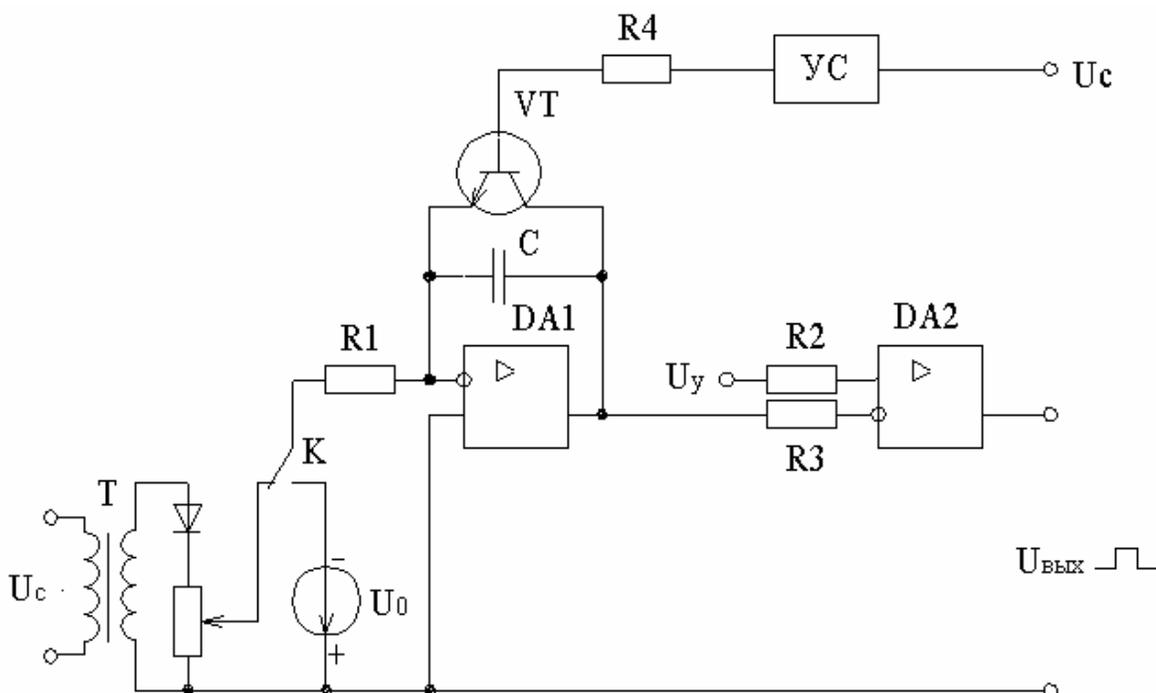


Рис.17.8 Схема ФСУ вертикального типа.

На рисунке 17.8 приведена принципиальная схема ФСУ вертикального типа. На операционном усилителе DA1 собрана схема интегратора.

При подаче на вход постоянного напряжения  $U_0$  на его выходе формируется линейно нарастающее опорное напряжение по уравнению (17.8). Действительно:

$$U_{\text{оп}} = \frac{1}{R_1 C} \int_0^t U_0 dt = \frac{U_0 t}{\tau},$$

где  $\tau = R_1 \cdot C$  – постоянная времени.

Выберем  $\tau = \frac{\pi}{\omega_0}$ ,  $U_0 = U_m$ , тогда:

$$U_{\text{оп}} = \frac{U_m \cdot \omega \cdot t}{\pi}.$$

При подаче на вход интегратора однополярного пульсирующего сетевого напряжения опорное напряжение равно:

$$U_{\text{оп}} = \frac{1}{R_1 C} \int U_m \cdot \sin \omega t dt = -\frac{U_m}{\omega} \cos \omega t,$$

то есть опорное напряжение имеет косинусоидальную форму.

Начало развёртки происходит в обоих случаях при нулевых начальных условиях, что обеспечивается замыканием закорачивающего ключа VT, управляемого напряжением сети.

На операционном усилителе DA2 собрана схема сравнения.

Помимо вертикального способа в ряде случаев применяется способ управления, основанный на интегрировании управляющего сигнала, называемый горизонтальным способом управления.

Структурная схема устройства приведена на рис.17.9.

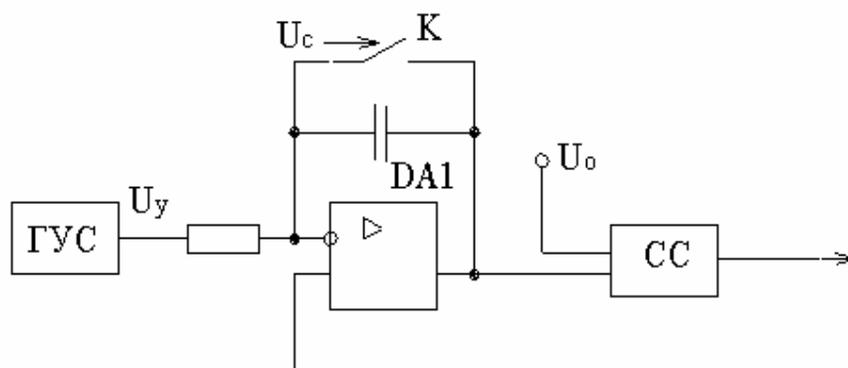


Рис.17.9. Структурная схема ФСУ горизонтального типа.

Его работа описывается уравнениями:

$$\frac{1}{\omega\tau} \int_0^{\omega t} U_y d(\omega t) = U_y \cdot \frac{t}{\tau},$$

$$U_y \cdot \frac{t}{\tau} = U_0. \quad (17.10)$$

Схема сравнения срабатывает в момент  $\omega t = \alpha$ . Отсюда находим выражение для фазовой характеристики:

$$t = \frac{U_0}{U_y} \cdot \tau,$$

$$\omega \cdot t = \frac{U_0}{U_y} \omega \cdot \tau,$$

$$\alpha = \frac{U_0}{U_y} \omega \cdot \tau. \quad (17.11)$$

Найдём уравнение регулировочной характеристики. Для этого выражение (17.11) подставим в уравнение (17.4):

$$U_d = U_{d0} \cos\left(\frac{U_0}{U_y} \omega \cdot \tau\right).$$

Выберем  $U_0 = U_m$  и выполним следующие преобразования:

$$\frac{U_d}{U_{d0}} = \cos\left[\frac{\omega\tau}{\left(\frac{U_y}{U_m}\right)}\right] \quad (17.12)$$

Регулировочная характеристика (кривая 4), приведённая на рисунке 17.5, имеет существенный нелинейный характер. Указанный недостаток ограничивает применение ФСУ горизонтального типа.

Вторым недостатком ФСУ этого типа является низкое быстродействие, связанное с интегрированием управляющего сигнала из-за чего изменения управляющего сигнала передаются на сравнивающий орган с запозданием.

Рассмотренные ФСУ могут формировать углы управления  $\alpha$  в диапазоне от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . Однако в реальных вентильных преобразователях диапазон изменения углов должен

быть ограничен: при работе в инверторном режиме  $\alpha \leq \alpha_{\max}$ , то есть  $\beta \geq \beta_{\min}$ , ограничение исключает инверторное опрокидывание преобразователя. При несимметрии питающей сети или погрешностях в работе системы управления при малых углах управления система управления может сформировать угол управления, несколько ранее момента естественной коммутации, что может привести к пропуску включения одного из вентилях. Поэтому при работе преобразователя  $\alpha \geq \alpha_{\min}$ . Ограничение рабочего диапазона углов управления может осуществляться несколькими способами, которые мы рассмотрим применительно к системам управления вертикального типа.

1. Ограничение диапазона изменения напряжения  $U_y$ . Однако этот способ не всегда эффективен, поскольку амплитуда опорного напряжения  $U_m$  может быть нестабильной, особенно при формировании напряжения косинусоидальной формы.

2. Выбор соответствующей формы опорного напряжения, величина которого резко увеличивается вблизи начала и конца развёртки, что препятствует формированию углов управления вблизи  $\alpha=0$  и  $\alpha=\pi$ . Характерная форма опорного напряжения приведена на рисунке 17.10.

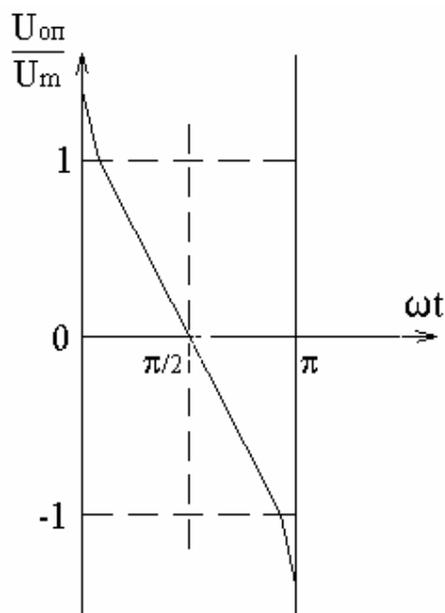


Рис.17.10 Форма опорного напряжения ФСУ вертикального типа.

### 17.3 Асинхронные фазосмещающие устройства.

При реализации асинхронного принципа управления информация о фазе питающей сети на ФСУ не подаётся, но поскольку углы управления вентилях преобразователя отсчитываются относительно моментов естественной коммутации, необходимо введение замкнутого контура управления. При этом на ФСУ подаётся сигнал пропорциональный выходному напряжению или току. Асинхронные разомкнутые системы управления зависимыми преобразователями неработоспособны.

Наибольшее распространение среди замкнутых асинхронных ФСУ получили схемы, основанные на принципе интегрального слежения. В таких схемах управляющий импульс вырабатывается в моменты времени, когда среднее значение выходного напряжения или тока на межкоммутационном интервале равно среднему значению управляющего сигнала на том же интервале, то есть:

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} U_y dt = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} k \cdot U_{\text{вых}} dt, \quad (17.13)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – моменты  $i$ -й и  $(i+1)$ -й коммутаций в силовой схеме.

Таким образом, при функционировании следящей системы среднее значение выходного напряжения или тока повторяет (отслеживает) управляющий сигнал. Благодаря этому достигается линейность регулировочной характеристики, в том числе при наличии искажающих воздействий, когда выражение (17.4) несправедливо

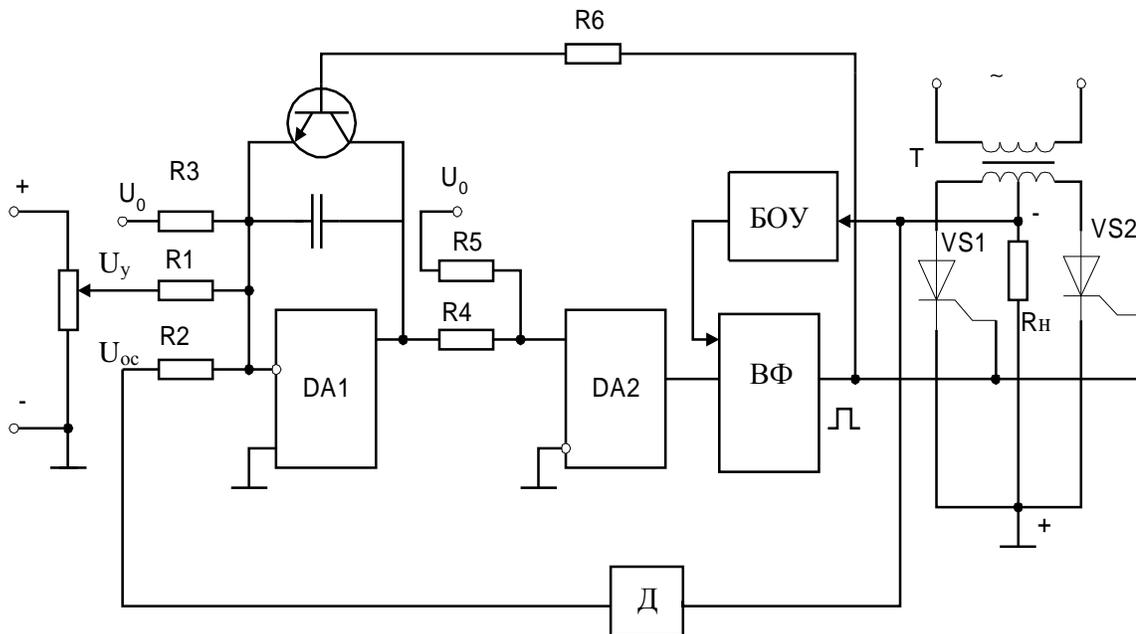


Рис. 17.11. Асинхронная (следящая) система управления выпрямителя.

Принципиальная схема следящего ФСУ приведена на рис.17.11, на ней условно показана силовая часть вентильного преобразователя. Выходной формирователь ВФ и блок ограничения углов управления БОУ, формирующий стробирующий сигнал. На интегратор на операционном усилителе DA1 поступает управляющее напряжение  $U_y$ , напряжение обратной связи  $U_{oc}$ , пропорциональное выходному напряжению и постоянное напряжение  $U_0$ . Напряжение с выхода интегратора поступает на схему сравнения на ОУ DA2, на которую также подается постоянное напряжение  $U_0$ . При срабатывании схемы сравнения вырабатывается управляющий импульс и интегратор обнуляется. Таким образом, работа устройства согласно схеме на рис.17.11 описывается уравнением:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t_1}^{t_2} (U_y - kU_{ВЫХ} + U_0) dt = U_0, \quad (17.14)$$

где  $\tau$  – постоянная интегрирования.

При реализации схемы выбирают  $\tau = \frac{2\pi}{m\omega}$ , где  $m$  – фазность вентильного преобразователя (по отношению к нагрузке).

Тогда на межкоммутационном интервале имеем:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t_1}^{t_2} U_0 dt = U_0. \quad (17.15)$$

Действительно, проинтегрировав левую часть уравнения (17.15), получаем:

$$\frac{1}{t} \int_{t_1}^{t_2} U_0 dt = \frac{U_0 t \Big|_{t_1}^{t_2}}{t} = \frac{U_0(t_2 - t_1)}{\frac{2p}{m\omega}};$$

учтем, что  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ ,  $\frac{T}{m} = \frac{2\pi}{m\omega}$ , а  $t_2 - t_1 = \frac{T}{m}$ . Тогда:  $\frac{U_0(t_2 - t_1)}{\frac{2p}{m\omega}} = \frac{U_0 \frac{T}{m}}{\frac{T}{m}} = U_0$ .

Подставив выражение (17.15) в равенство (17.14):

$$\frac{1}{\tau} \int_{t_1}^{t_2} U_y dt - \int_{t_1}^{t_2} k U_{\text{ВЫХ}} dt + U_0 = U_0.$$

Таким образом, выражение (17.14) сводится к равенству (17.13), то есть обеспечивается линейность регулировочной характеристики преобразователя  $U_d = f(U_y)$ . При отклонении межкоммутационного интервала от величины  $\frac{2\pi}{m\omega}$  напряжение  $\frac{U_0(t_2 - t_1)}{\tau} \neq U_0$ .

При этом на схему сравнения воздействует напряжение, стабилизирующее межкоммутационный интервал. То есть введение источника  $U_0$  позволяет стабилизировать величину  $(t_2 - t_1)$ , при этом увеличивается устойчивость работы преобразователя. Анализ показывает, что при  $U_0 = 0$  преобразователь со следящей системой управления в инверторном режиме работает неустойчиво. При увеличении  $U_0$  возможность возникновения незатухающих колебаний уменьшается. Однако быстрое действие системы при изменении управляющего сигнала так же при колебаниях углов управления они могут выходить за пределы  $\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ . При выработке ФСУ угла управления  $\alpha > \alpha_{\max}$  выходной формирователь будет ранее запущен с выхода блока БОУ с задним фронтом стробирующего импульса.

Аналогичным образом могут быть построены следящие системы с обратной связью по току. Исследования показали, что системы с обратной связью по интегралу тока за межкоммутационный интервал принципиально неустойчивы. Поэтому нашли применение следящей системы с обратной связью по мгновенному значению выходного тока (пропорциональный регулятор) и мгновенному и интегральному значениям тока (ПИ-регулятор).

#### 17.4 Многоканальные системы управления

Предельный диапазон изменения углов управления преобразователей от  $\alpha = 0$  до  $180^\circ$ . Частота следования управляемых импульсов, то есть частота управления, зависит от длительности межкоммутационного интервала. В мостовом трехфазном преобразователе частота управления  $f_k = 6f_c$ . На рис.17.12 показано выходное напряжение названного преобразователя, управляющее напряжение, система опорных напряжений косинусоидальной формы и управляющие импульсы каждого вентиля  $u_{y,i}$ . Для обеспечения работы каждого вентиля формируется свое опорное напряжение, начало которого соответствует моменту естественной коммутации данного вентиля. Момент пересечения  $i$ -го опорного напряжения  $U_{\text{оп},i}$  с управляющим сигналом  $U_y$  соответствует моменту выработки управляющего импульса на  $i$ -ый вентиль. Указанный принцип формирования реализуется в многоканальной системе управления, в которой существует несколько независимых работающих каналов управления, каждый из которых включает ФСУ и выходной формирователь. Многоканальные системы управления получили широкое распространение. Структурная схема системы управления вентильным преобразователем выполненная по трехфазной

мостовой схеме приведена на рис.17.13. Каждый из каналов реализует вертикальный принцип управления, структура ФСУ рассмотрена на рис.17.6.

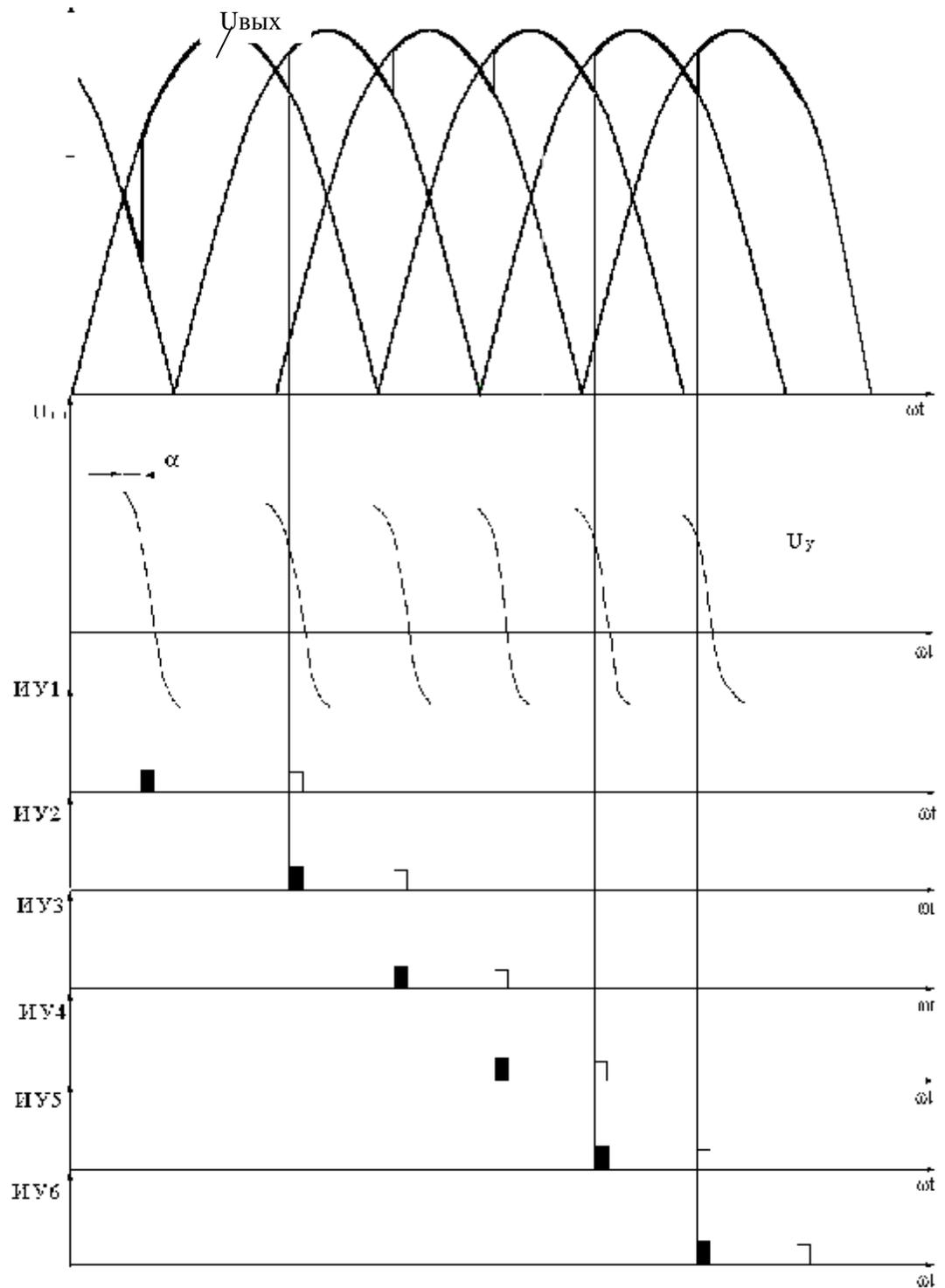


Рис.17.12. Временные диаграммы работы многоканальной системы управления вертикального типа.

При работе мостовой схемы проводит ток одновременно два вентиля: один из катодной группы, второй из анодной группы. В режиме непрерывного тока нагрузки вентиль непрерывно проводит ток течения интервала  $\varphi=120^\circ$  (при мгновенной коммутации) и для нормальной работы преобразователя достаточно однократно включить вентиль, один

раз за период питающей сети. В режиме прерывистого тока нагрузки длительность работы пары вентиля меньше  $60^\circ$ , после чего ток в нагрузке прерывается, и тиристоры запираются. Так  $i$ -ый тиристор, проработав в паре с  $(i-1)$ -ым вентиляем, запирается и в момент подачи управляющего импульса на  $(i+1)$ -ый тиристор остается запертым, проводящей пары тиристоров не образуется, работа вентиляного преобразователя нарушается.

Для предотвращения срыва работы, в режиме прерывистого тока, одновременно с подачей управляющего импульса  $(i+1)$ -ый вентиль, подается повторный импульс на управляющий электрод  $i$ -го тиристора. Повторные импульсы показаны на рисунке 17.12.(не заштрихованные). Таким образом, для обеспечения надежной работы мостовой схемы, необходима подача сдвоенных импульсов. Это достигается тем, что выходной формирователь ВФ  $(i+1)$ -го канала связан не только с  $(i+1)$ -ым тиристором, но и с управляющим электродом  $i$ -го вентиля. В другом варианте схемы (рисунок 17.13.) ФСУ  $(i+1)$ -го канала связывают с выходными формирователями  $i$ -го и  $(i+1)$ -го канала.

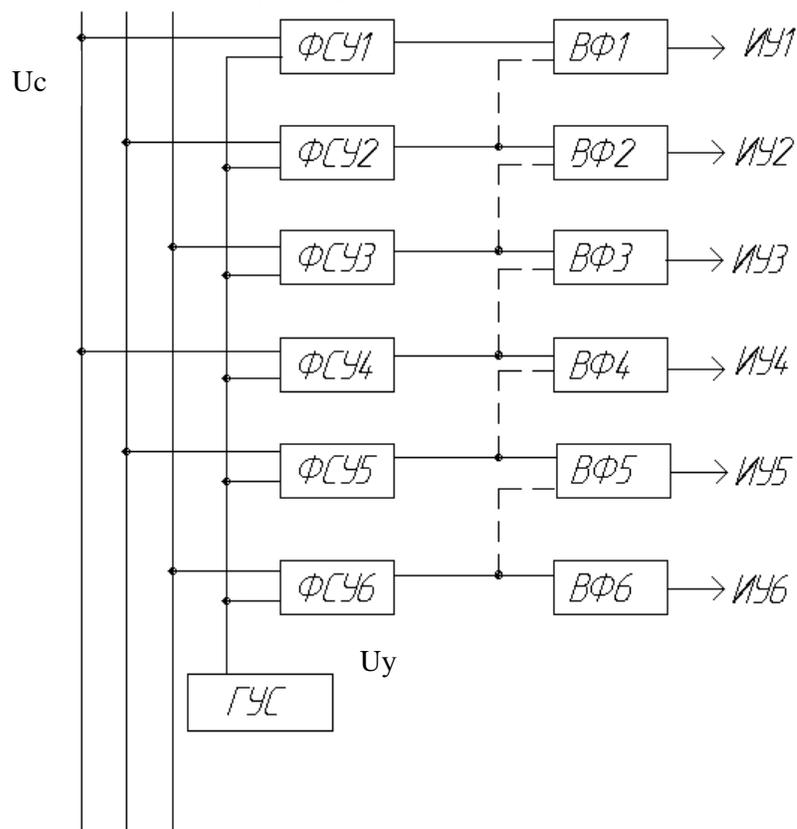


Рис.17.13. Структурная схема многоканальной системы управления

Достоинством многоканальной системы управления является максимальная простота схемы ФСУ выходного формирователя каждого канала. При использовании вертикального принципа управления, достигается максимальное быстродействие, т.к. каналы вырабатывают управляющие импульсы поочередно, непрерывно следуя за изменениями управляющего сигнала. Однако многоканальные схемы имеют серьезные недостатки. Любая несимметрия каналов управления приводит к несимметрии управляющих импульсов, подаваемых на силовые тиристоры, и ведет к появлению в выходном напряжении дополнительных гармоник с весьма низкой частотой, которые плохо поддаются фильтрации и неблагоприятно влияют на работу многих потребителей энергии.

Главным источником аппаратной несимметрии являются формирователи опорного напряжения. При формировании опорного напряжения косинусоидальной формы из сети, при фильтрации сетевых напряжений вносится фазовый сдвиг, который может значительно

различаться в каналах управления. Чем выше несинусоидальность сети, тем выше требования к подавлению высших гармонических, тем больше фазовая погрешность. Это объясняется тем, что в фильтрах с высокой избирательностью зависимость фазы от частоты очень сильна. При формировании опорного напряжения генератором линейно – изменяющихся напряжений, трудно обеспечить формирование системы идентичных по форме и амплитуде опорных напряжений, сдвинутых друг относительно друга на угол  $2\pi/m$ .

Реализация этого требования приводит к чрезвычайно громоздким схемным решениям.

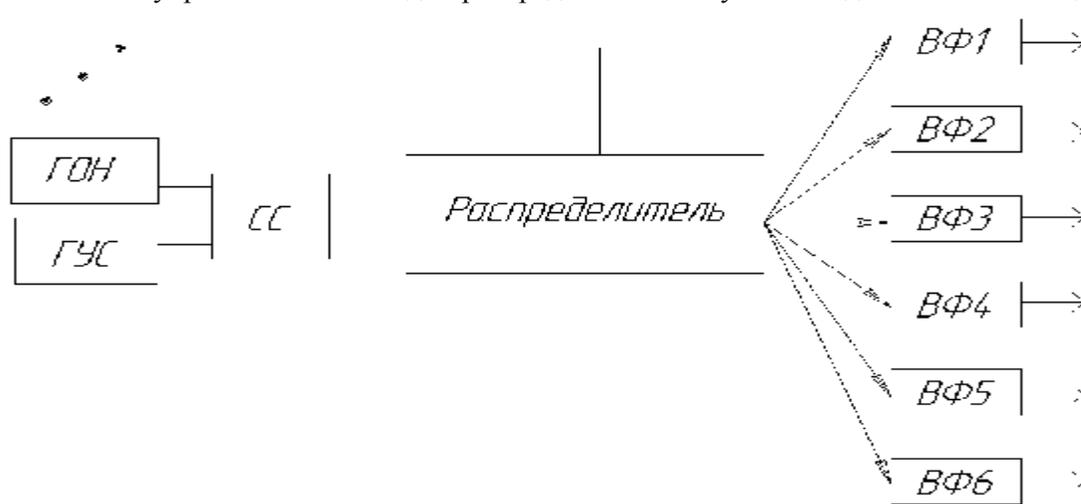
Указанный недостаток успешно преодолевается при создании одноканальных систем управления, которые будут рассмотрены в лекции №18.

Аппаратная несимметрия в многоканальных системах управления не является единственным источником несимметрии управляющих импульсов. При несимметрии напряжений питающей сети в многоканальную систему управления поступают несимметричные сигналы, синхронизирующие опорные напряжения, и эта несимметрия в конечном счете приводит к несимметрии управляющих импульсов. Гармонический анализ выходного напряжения выпрямителя показывает, что наименьшее содержание низкочастотных составляющих спектра выходного напряжения, вызванных несимметрией сети, обеспечивается при равномерном следовании управляющих импульсов с интервалом  $2\pi/m$  между ними (при неизменном  $U_y$ ). Реализация такого управления возможна только при использовании одноканальных систем управления.

## Лекция 18. Одноканальные системы управления .

### 18.1. Способы построения одноканальных систем управления.

При построение одноканальных устройств управления, рисунок 18.1., моменты включения всех силовых вентилях, определяются единым ФСУ. Импульсы с выхода ФСУ поступают на распределитель импульсов, который осуществляет распределение импульсов по каналам управления. К выходам распределителя импульсов подключаются выходные



ные формирователи каналов.

Рис.18.1. Структурная схема одноканальной системы управления вертикального типа.

Наиболее часто одноканальное управление осуществляется следующим образом:

1. Система с ограниченным диапазоном изменения углов управления.

При диапазоне изменения углов управления  $\Delta\alpha < 2\pi/m$  для всех каналов управления может быть сформировано опорное напряжение, например линейно –изменяющееся напряжение. При  $m=2$  угол управления может изменяться в полном диапазоне  $\Delta\alpha=0\dots\pi$ . Поэтому системы управления однофазными вентильными преобразователями принципиально одноканальные. При  $m=3$  достигим диапазон  $\Delta\alpha=0\dots2\pi/3$ , что бывает достаточным для реализации выпрямителей для многих нагрузок. При  $m=6$   $\Delta\alpha=0\dots\pi/6$ , что соответствует очень ограниченному кругу потребителей.

2. Системы управления с фиксированным сдвигом управляющих импульсов между каналами.

ФСУ одного из каналов выполняется так же, как в многоканальных системах управления. С его выхода команда на формирование управляющего импульса поступает непосредственно на выходной формирователь данного канала и на узлы задержки (одно-вибраторы). Первый одновибратор имеет время задержки  $2\pi/m$ . Задним фронтом импульса 1-го одновибратора запускается выходной формирователь 2-го канала. Время задержки 2-го канала  $4\pi/m$ . Его импульс запускает выходной формирователь 3-го канала и т.д. Подобное построение системы управления приводит к 2-м недостаткам: во-первых, уменьшается быстродействие системы, так как фазовое управление осуществляется с частотой сети, а угол управления последующих тиристоров лишь повторяет угол управления первого, во-вторых, нестабильность временной выдержки одновибраторов приводит к несимметричности управляющих импульсов.

3. Асинхронный принцип управления предусматривает возможность построения одноканального ФСУ, который последовательно формирует управляющие импульсы всех каналов, которые затем поступают на распределитель импульсов. Асинхронные системы управления обладают меньшим быстродействием по сравнению с разомкнутыми системами управления вертикального типа.

4. Функционально полные синхронные одноканальные системы управления, в которых возможна отдельная регулировка углов управления всех каналов без ограничения диапазона изменения углов  $\alpha$ .

Наиболее совершенными из систем данного типа являются устройства, основанные на вертикальном принципе управления. В таких системах (рис. 18.1) формируется единое для всех каналов опорное напряжение, представляющее собой совокупность отрезков косинусоидальной или линейной формы длительностью  $2\pi/m$ . Начало отрезка совпадает с моментом выработки управляющего импульса для  $i$ -го вентиля, конец – с управляющим импульсом для  $(i+1)$ -го вентиля. Данный отрезок опорного напряжения используется в ФСУ для определения угла управления  $(i+1)$ -го вентиля.

Одноканальные системы такого типа сочетают достоинства многоканальных и одноканальных устройств, обеспечивают высокое быстродействие, линейность регулировочных характеристик, симметрию управляющих импульсов.

### **18.2 Физическая модель силовой части вентильного преобразователя, как многофункциональный элемент систем управления.**

Зависимые преобразователи, в отличие от автономных, организованы так, что очередность (алгоритм) включения вентиля задается самой структурой преобразователя и порядком чередования фаз питающей сети. При построении системы управления для таких преобразователей, алгоритм её работы включает в себя синхронизацию (принадлежность каждого вентиля определённой фазе сетевого напряжения), фазовое регулирование управляющих импульсов в заданном диапазоне и распределение импульсов управления (подача одного импульса за период работы соответствующего вентиля).

Такой алгоритм может быть реализован в виде структурной схемы, представленной на рис. 18.1, где каждая из вышеназванных операций выполняется соответствующим функциональным элементом. Однако возможно и более рациональное применение многофункциональных элементов при построении одноканальных систем управления, совмещающих в себе несколько операций. В качестве такого многофункционального элемента можно использовать физическую модель силовой части вентильного преобразователя.

На рис. 18.2. в качестве примера приведена одноканальная система управления трёхфазным нулевым выпрямителем. Схема содержит ФСУ, вентильно – комбинационную схему (ВКС) и модель силовой части вентильного преобразователя (МВП). МВП выполняет функции синхронизации ФСУ, генератора развёртки (отрезков синусоид) для ФСУ вертикального типа. Совместно с ВКС МВП образует распределитель импульсов, синхронизированный с сетью. Кроме того, применение МВП в качестве распределителя позволяет осуществить в ФСУ формирование выходных импульсов с помощью одного общего формирователя.

Рассмотрим работу схемы, приведённой на рис. 18.2. Формирование импульсов в ФСУ происходит в моменты равенства сигнала управления и сигнала развёртки, в качестве которого используется напряжение с выхода МВП. Импульсный сигнал с выхода ФСУ поступает на общий вход ВКС, который представляет собой матрицу из трёх резисторов и трёх диодов. Диоды ВКС подключены к анодам тиристоров МВП. В результате этого происходит блокирование (запрет) открытым ранее тиристором поступления управляющих импульсов на тот тиристор МВП, который не должен в данный момент включаться. Так, например, если на предыдущем такте был открыт тиристор VS10 МВП, то на следующем такте должен быть включен VS11. При этом, ранее открытый тиристор VS10, благодаря диоду VD4, шунтирует управляющий переход тиристора VS12, исключая тем самым подачу импульса на тиристор VS12 в данный момент. После включения тиристора VS11 происходит отпирание тиристора VS12, так как управляющий сигнал тиристора VS10 шунтирован открытым тиристором VS11. Схема работает аналогично и в последующие такты.

Выходные импульсы снимаются через разделительные диоды VD1 – VD3 с помощью импульсных трансформаторов или оптронных устройств. Точка F является общей, относительно которой снимаются импульсы. Подключая МВП и силовую часть вентильного преобразователя к одноимённым фазам сети, можно добиться синхронной и синфазной их работы, когда включению одного из тиристоров МВП будет соответствовать включение соответствующего тиристора в силовой части.

Источник постоянного напряжения E, включённый в цепь нагрузки МВП, предназначен для поддержки непрерывного тока через тиристоры VS10 – VS12 МВП.

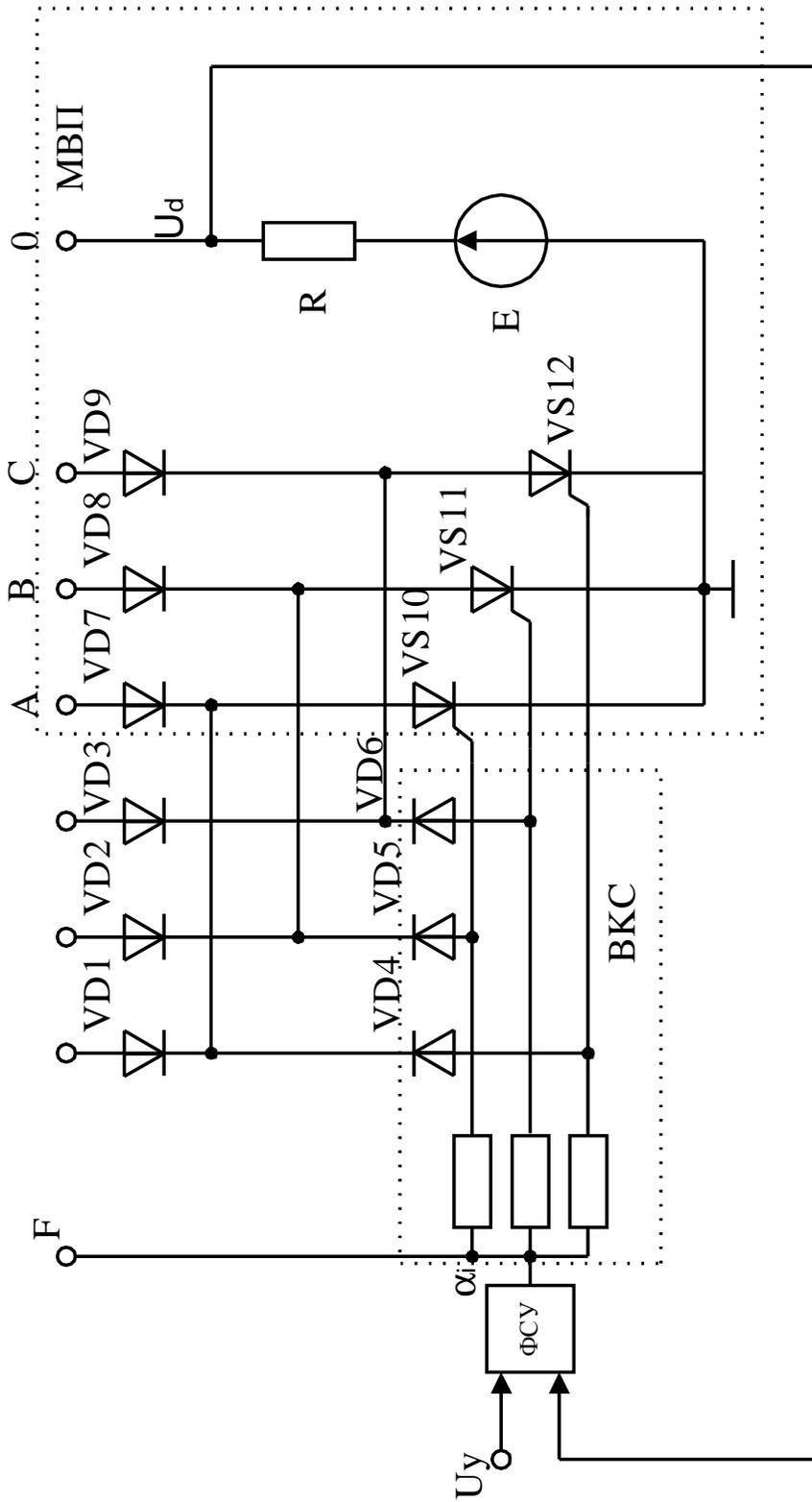


РИС. 18.2. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ОДНОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С МОДЕЛЮ ВЕНТИЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ