

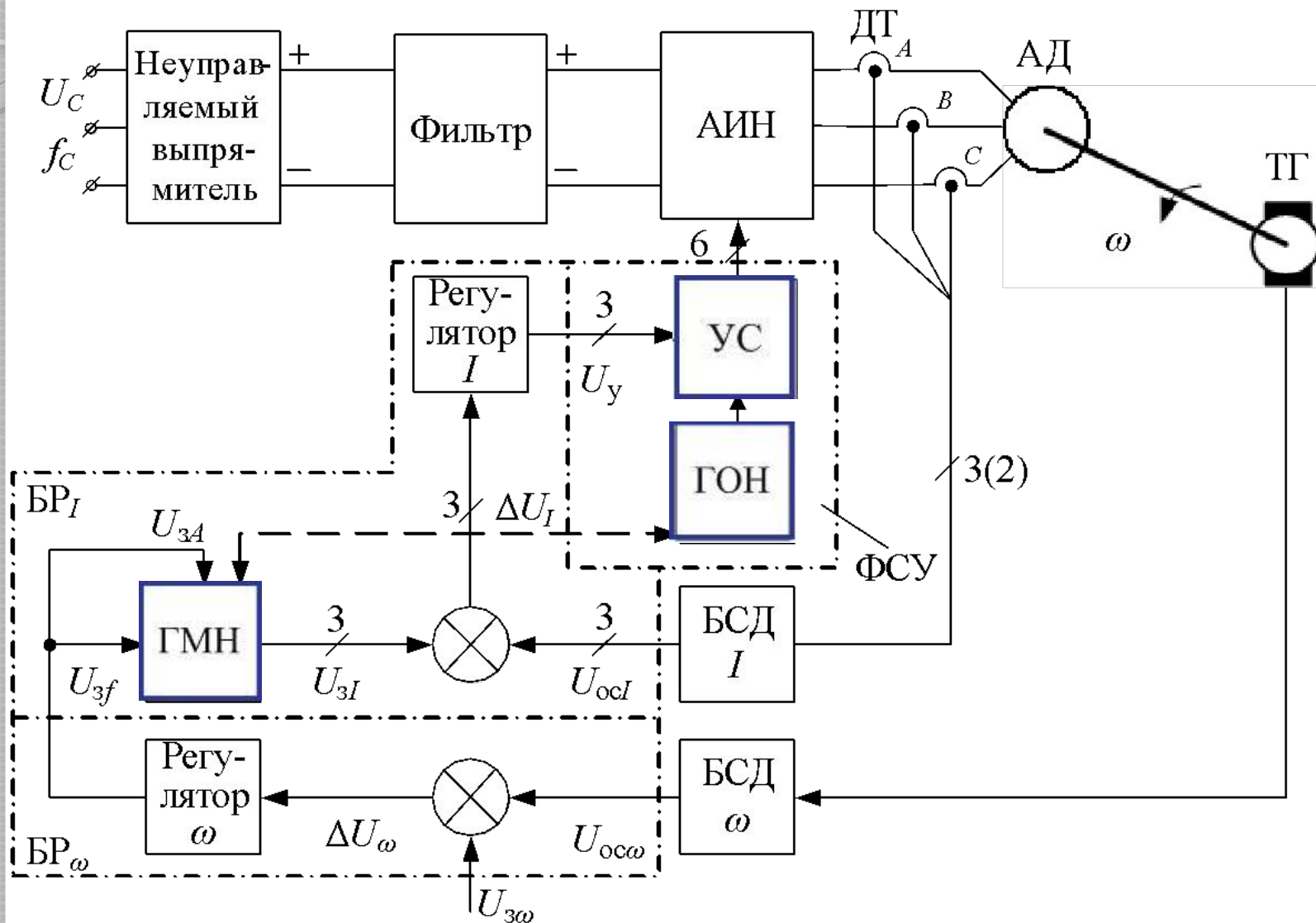
# **Микропроцессорные системы управления устройствами силовой электроники**

## Глава 1

### МПСУ Автономными инверторами напряжения



# Типовая структура системы автоматического регулирования электроприводом переменного тока



# Программная часть системы управления

## Отличия электропривода переменного тока

- **ГМН** — самый быстрый **+** **ГОН** — как **трехф** **УС**
  - В системе управления **ГОН** — три формы сигнала **УС** — за
- типа сигналов:** опорный сигнал пилообразной формы и модулирующий сигнал (чаще синусоидальной формы) имеющие различные частоты

- Модулирующий сигнал и сигнал обратной связи по току имеют **синусоидальную знакопеременную форму** при постоянной мощности
- Частота опорного сигнала в системе управления АИН, как правило, значительно **больше 300 Гц**

- Для управления двигателями переменного тока используются прежде всего законы частотного управления: **при вентиляторном моменте нагрузки**

**И векторное управление: по вектору потокосцепления статора или ротора, момента и т.д.**

**ВЫВОД:** Микропроцессор МПСУ АИН  
должен обладать:

- разрядностью не менее **16 бит;**
- тактовой частотой не менее **50 МГц**, для обеспечения производительности десятки - сотни MIPS.

**Поэтому МПСУ АИН появились гораздо позже, чем МПСУ УВ**

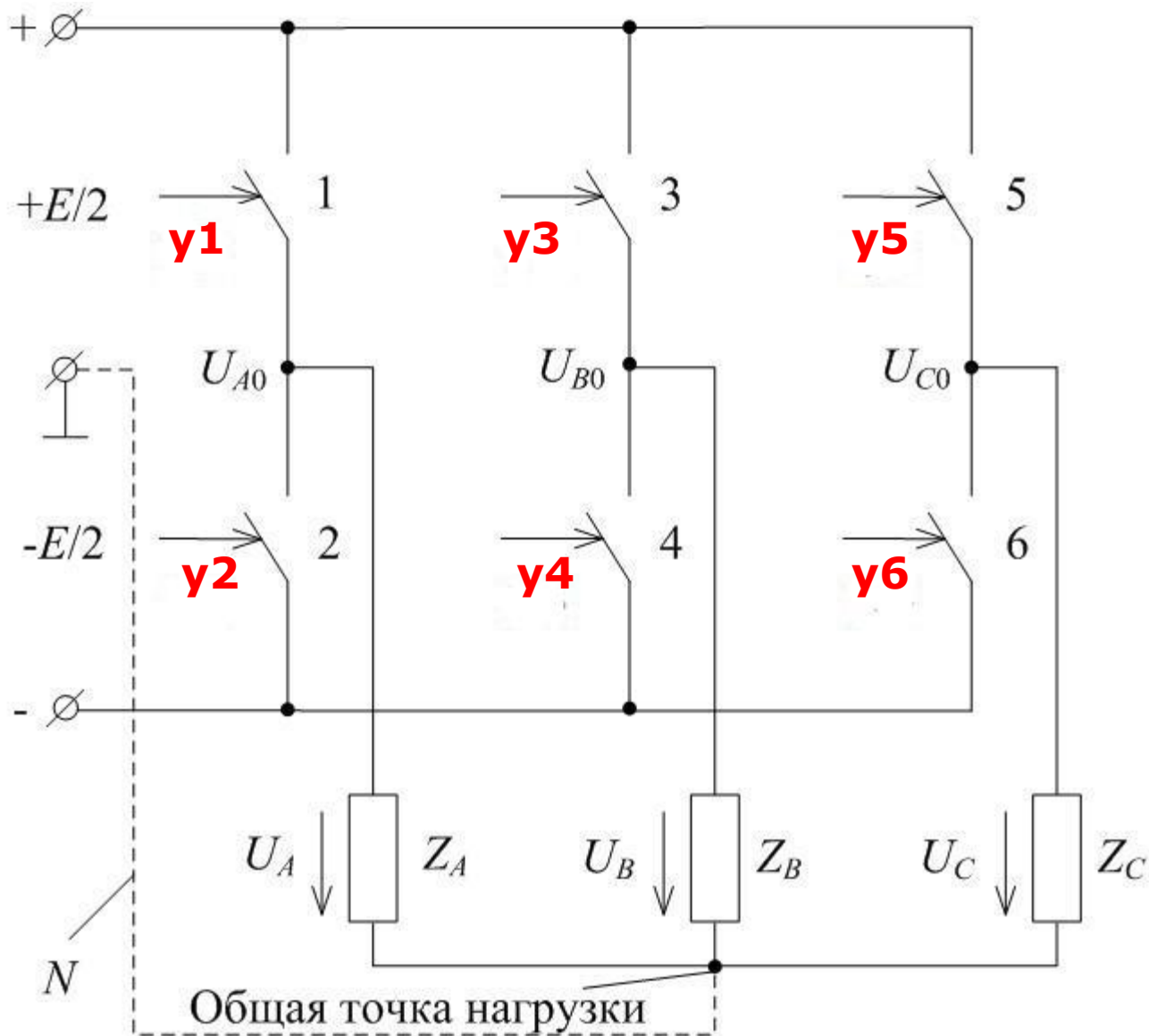
# 1.2.1. Коммутационная модель АИН

И. А. Баховцев



# 1.2. ПРОГРАММНЫЕ СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ АИН

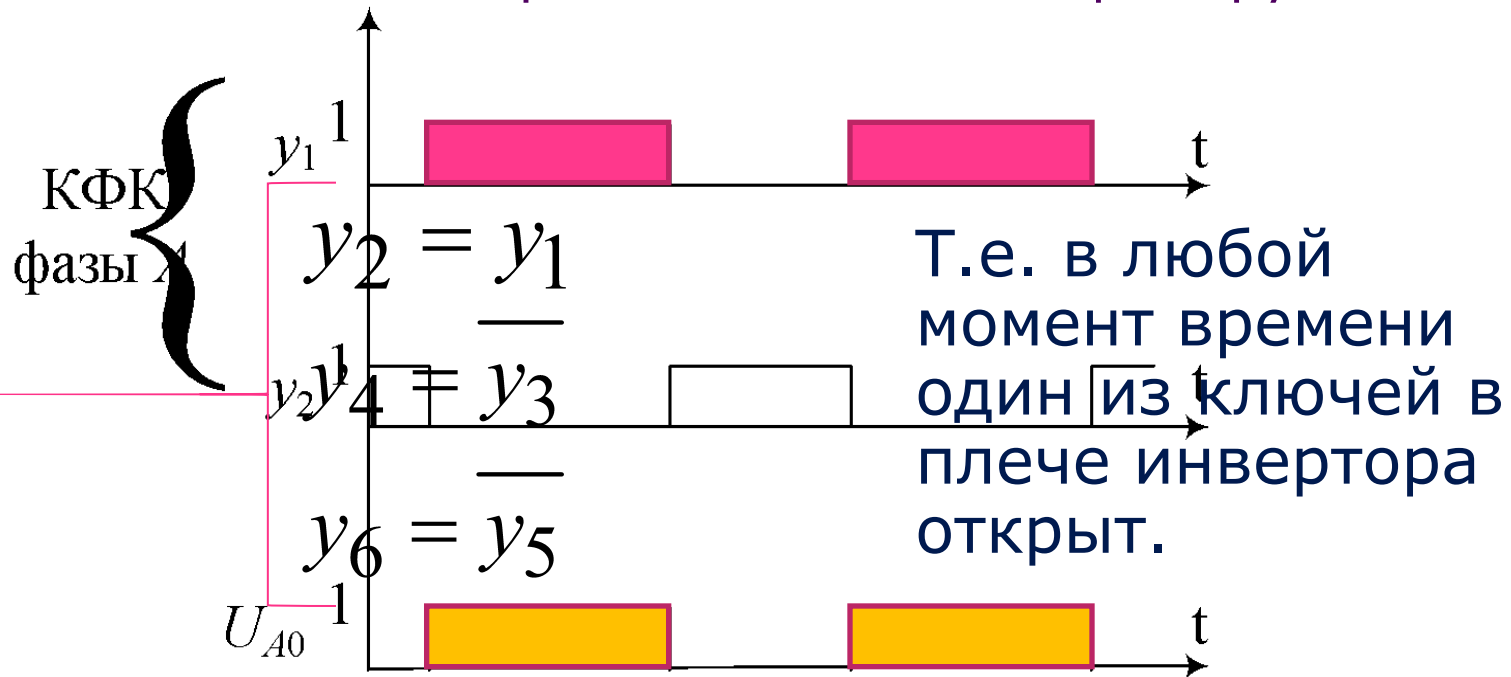
# Коммутационная модель АИН



Коммутационные функции ключей (КФК)

# Комплементарный режим управления

Это - необходимое условие независимости формы выходного напряжения АИН от  $\cos\varphi$  нагрузки:



Как видно, КФК  $y_1 \equiv U_{A0}$ , аналогично  $y_3 \equiv U_{B0}$  и  $y_5 \equiv U_{C0}$ , значит зная форму коммутационных функций верхних ключей, можно построить кривые фазного и линейного напряжения.



# Коммутационные функции фаз

- $Y_1 = Y_A$
- $Y_3 = Y_B$
- $Y_5 = Y_C$



## **Вектор состояния АИН**

– значения трех коммутационных функций фаз в один и тот же момент времени.





# Опорный сигнал ШИМ Модулирующий сигнал

Форма опорного сигнала	Внешний вид опорного сигнала	Вид ШИМ	Регулирующая характеристика	$L$
<ul style="list-style-type: none"> <li>● задает частоту (цикл) модулированных по длительности импульсов</li> <li>● определяет закон изменения длительности импульсов (т.е. частоту коммутации вентилей АИИ) во времени, а также частоту выходного напряжения</li> </ul>		Односторонняя ШИМ	Линейная	1
<ul style="list-style-type: none"> <li>● форма опорного сигнала определяет число фронтов (один или два), модулируемых по положению на периоде</li> <li>● оказывает существенное влияние на выходные ШИМ</li> </ul>		Двусторонняя ШИМ	Линейная	2
<ul style="list-style-type: none"> <li>● форма опорного сигнала определяет линейность регулировочной характеристики АИИ</li> </ul>		Двусторонняя ШИМ	Нелинейная	2

Примечание.  $L$  – число импульсов в линейном напряжении на периоде биполярного опорного сигнала. Для однополярного опорного сигнала всегда  $L=1$ .

# ШИМ



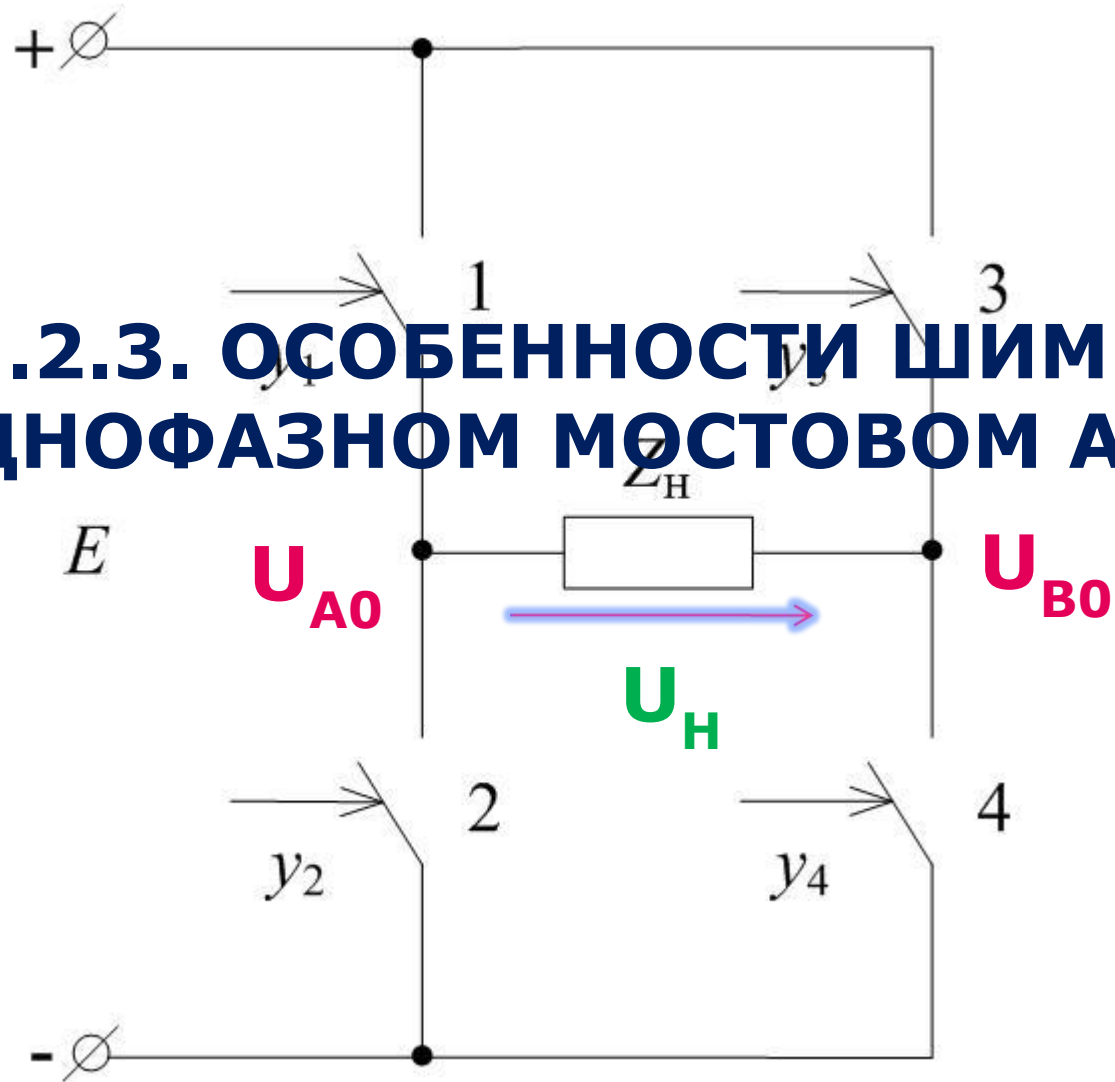
Опорный  
сигнал

Модулирующий  
Векторные  
сигнал  
способы

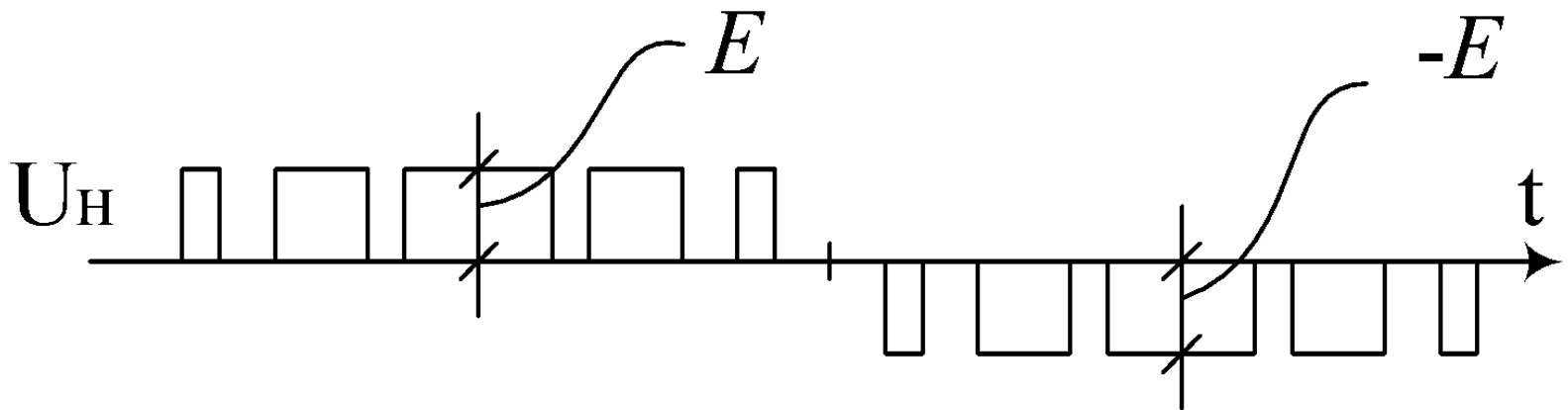
Форма модулирующего сигнала (тип ШИМ)	Внешний вид модулирующего сигнала	Качество выходного напряжения	Линейный диапазон регулировочной характеристики
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Прямоугольная (-/-ШИМ, ШИР)</li> </ul>		Неудовлетворительное	Максимальный
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Треугольная (-/ШИМ)</li> </ul>		Неудовлетворительное	Традиционный
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Трапецеидальная (-/-ШИМ)</li> </ul>		Неудовлетворительное	Расширенный
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Синусоидальная (-/ШИМ)</li> </ul>		Хорошее	Традиционный
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Синусоидальная 3-й информации (-/-ШИМ)</li> </ul>		Хорошее	Расширенный
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Синусоидальная с меандром (Циклическая ШИМ)</li> </ul>		Удовлетворительное	Расширенный

гармонический сигнал представляется на комплексной плоскости в виде вращающегося вектора; используется понятие «обобщенного вектора» трехфазной системы напряжений; представление на комплексной плоскости 6 основных состояний АИН в ОШИР; информация для формирования длительностей импульсов является не модулирующий сигнал, а требуемое выходное напряжение АИН

## 1.2.3. ОСОБЕННОСТИ ШИМ В ОДНОФАЗНОМ МОСТОВОМ АИН



# Однополярная синусоидальная ШИМ

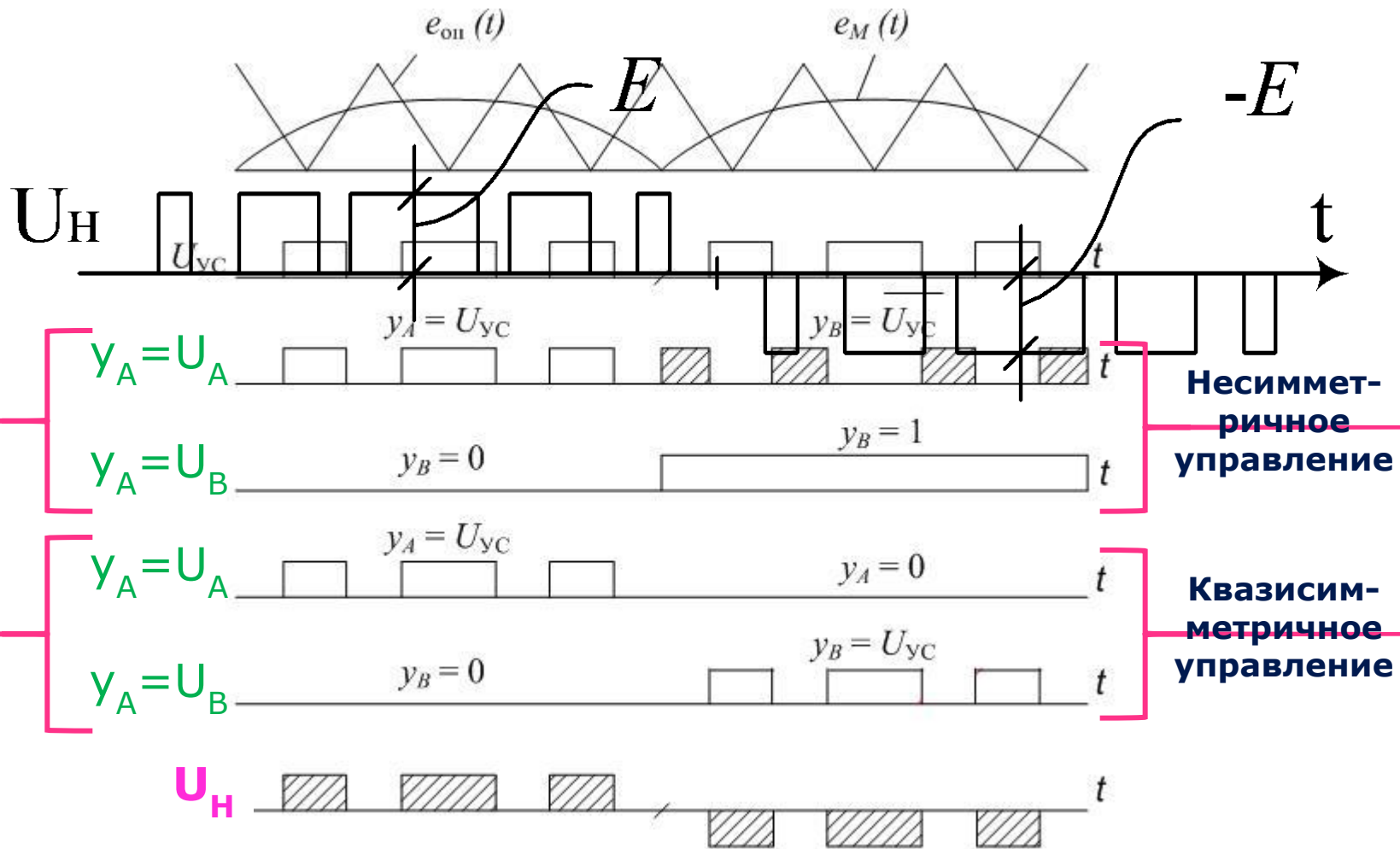


- Данное выходное напряжение можно реализовать тремя алгоритмами управления:
- **Симметричным**
- **Несимметричным**
- **Квазисимметричным**

# Алгоритмы реализации выходного напряжения однофазного АИН

Тип алгоритма	Плечо А		Плечо В		Устройство сравнения	Форма сигнала
Симметричный 1	$e_M(t), e_{оп}(t)$		$-e_M(t), e_{оп}(t)$		Двух-канальное	$e_M(t), e_{оп}(t)$ биполярные
Симметричный 2	$e_M(t), e_{оп}(t)$		$e_M(t), -e_{оп}(t)$		Двух-канальное	$e_M(t), e_{оп}(t)$ биполярные
Несимметричный	$e_M(t), e_{оп}(t)$		Нет модуляции		Одно-канальное	$e_M(t), e_{оп}(t)$ одно-полярные
	$0 \dots T/2$	$T/2 \dots T$	$0 \dots T/2$	$T/2 \dots T$		
	$y_A = U_{yc}$	$y_A = \overline{U_{yc}}$	$y_B = 0$	$y_B = 1$		
Квази-симметричный	$e_M(t), e_{оп}(t)$		$e_M(t), e_{оп}(t)$		Одно-канальное	$e_M(t), e_{оп}(t)$ одно-полярные
	$0 \dots T/2$	$T/2 \dots T$	$0 \dots T/2$	$T/2 \dots T$		
	$y_A = U_{yc}$	$y_A = 0$	$y_B = 0$	$y_B = U_{yc}$		

# Однополярная синусоидальная ШИМ





## Выводы

- Одну и ту же форму выходного напряжения однофазного АИН можно реализовать в системе управления **по-разному**
- Это будет справедливо применительно и к **другим способам управления** и к **другим схемам преобразователя**
- Разрабатывая систему управления АИН с ШИМ в условиях заданных ограничений, разработчик может придти к собственному, **оригинальному** варианту реализации

## 1. Глубина модуляции

- это отношение амплитуды модулирующего сигнала к амплитуде опорного сигнала.

Она определяет среднюю величину **первой гармонической составляющей** выходного напряжения.

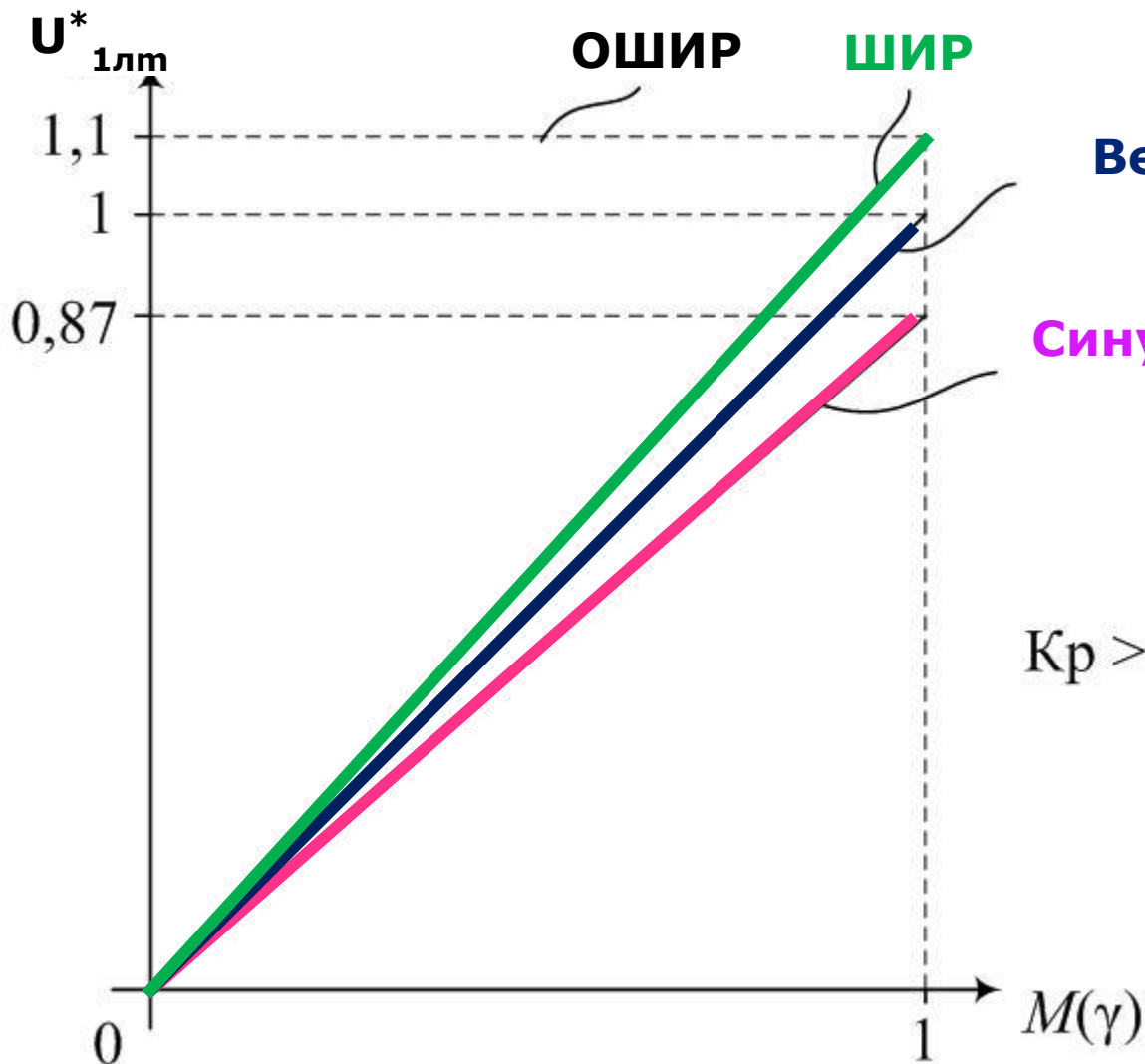
Зависимость амплитуды первой гармоники выходного напряжения от глубины модуляции называется **регулирующей характеристикой АИИ**.

Глубина модуляции подобна коэффициенту заполнения  $\gamma$ , характеризующему широтно-импульсное регулирование (ШИР):

$$\gamma = \frac{\tau_{И}}{T_{И}} = \frac{E_{у}}{E_{оп}} = 0...1$$

# Регулировочные характеристики АИН

№ п/п	«с/л»
1	$U_{1c}$
2	$U_{1л}$



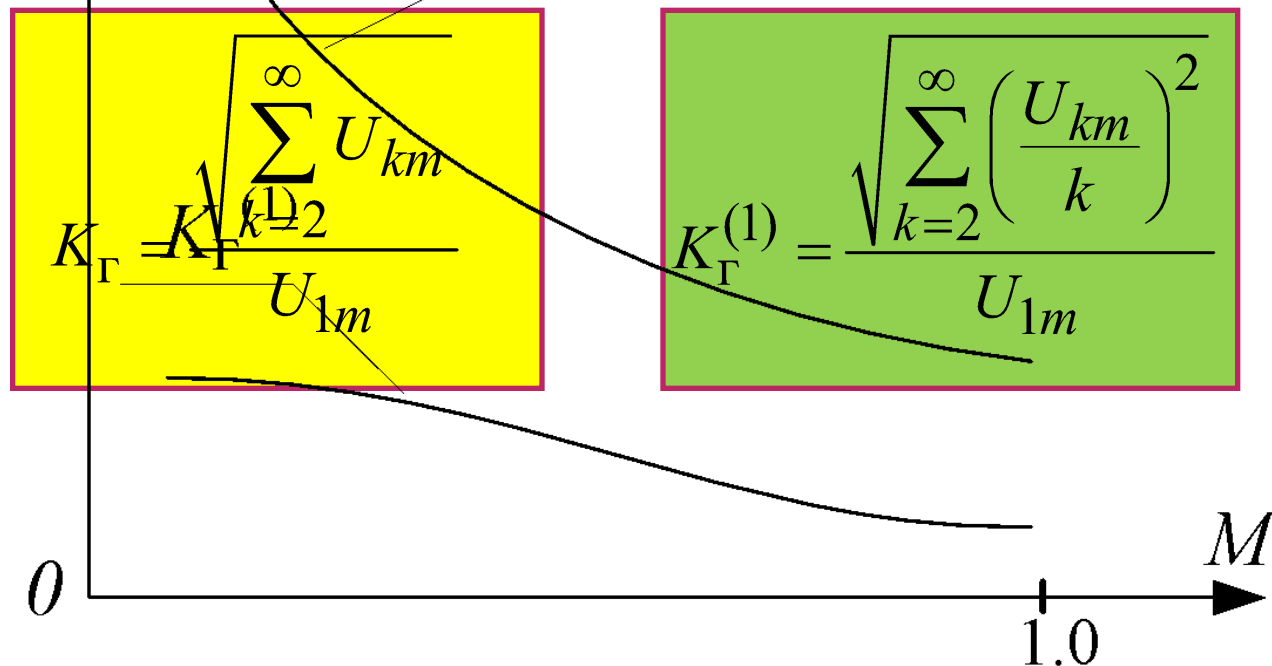
Векторная ШИМ,  $64E\gamma$

Синусоидальная ШИМ  $\bar{U} = 1,1E\gamma$

$U_{1лм}^*$  – выражена в относительном выражении к  $E$

- Глубина модуляции влияет также и на величину остальных гармоник спектра выходного напряжения, т.е. на **качество выходного напряжения**.

- Оно оценивается следующими **коэффициентами гармоник** (где  $k$  - номер гармоники):



# ПАРАМЕТРЫ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

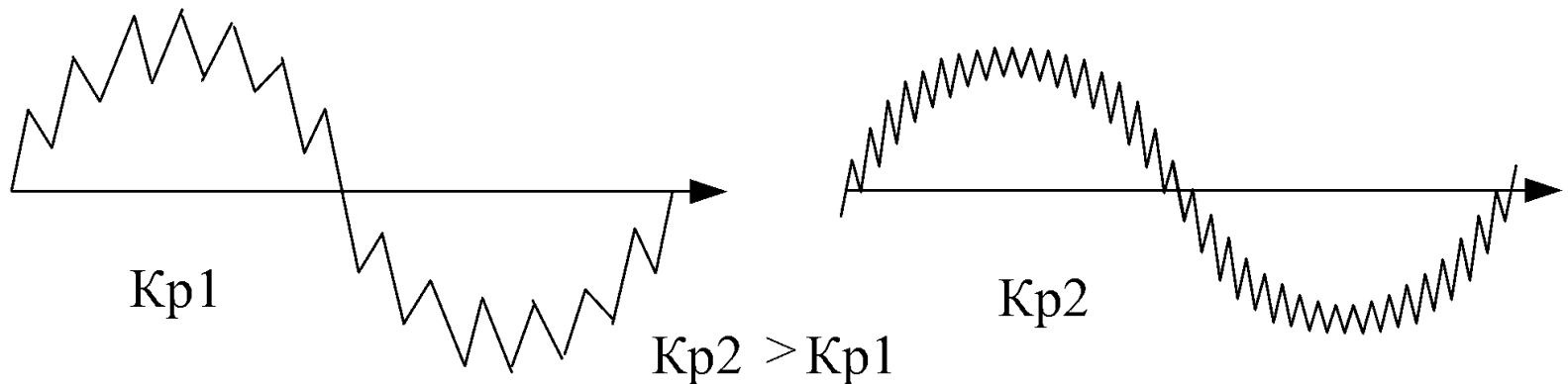
## 2. Кратность частот опорного и модулирующего сигналов

● Кратность определяет количество импульсов управления на период модулирующего сигнала и, соответственно, количество импульсов на периоде выходного напряжения.

$$K_p = \frac{f_{оп}}{f_M} = \frac{T_M}{T_{оп}}$$


Спектр выходного напряжения АИН с ШИМ

- На практике стараются **увеличить** кратность, чтобы сместить гармоники в область **высоких частот** и более эффективно использовать фильтрующие свойства нагрузки.
- По сути дела данный параметр ШИМ **влияет** не на качество выходного напряжения, а **на качество выходного тока** или выходной энергии.



# Ограничения на $K_p$ :

- «Сверху» - с увеличением кратности возрастают и коммутационные потери в АИН, снижается его КПД.

Тип ключей	$f_{\max}$ , (кГц)
<i>MOSFET</i>	20...50
<i>IGBT</i>	1...20
<i>GTO</i>	0,5...1

- «Снизу» - при  $K_p < 10$  гармоники низкочастотной части первой комбинационной группы начинают «наплывать» на первую гармонику со своим фазовым сдвигом и тем самым приводят к нарушению линейности регулировочной характеристики АИН.

# **1.4. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА В МПСУ**



## 1.4.1. Микропроцессорная реализация непрерывных сигналов

1. МС задает основные выходные характеристики АИН. => К МС - жесткие требования. => При разработке МПСУ АИН качественное формирование МС – важная задача.
2. Микропроцессорные (цифровые) устройства – дискретные по времени и амплитуде. => Дискретный характер имеют формируемые ими временные функции.
3. Пример: генератор пилообразного сигнала. Его цифровой аналог – суммирующий 2-й счетчик. Графическое изображение его цифрового кода – линейная ступенчатая функция.

**В МПСУ любой непрерывный сигнал заменяется соответствующей ступенчатой функцией.**

4. В общем случае дискретность формируемого сигнала по амплитуде определяется разрядностью ШД МП, а по времени – периодом высокочастотных тактовых импульсов.

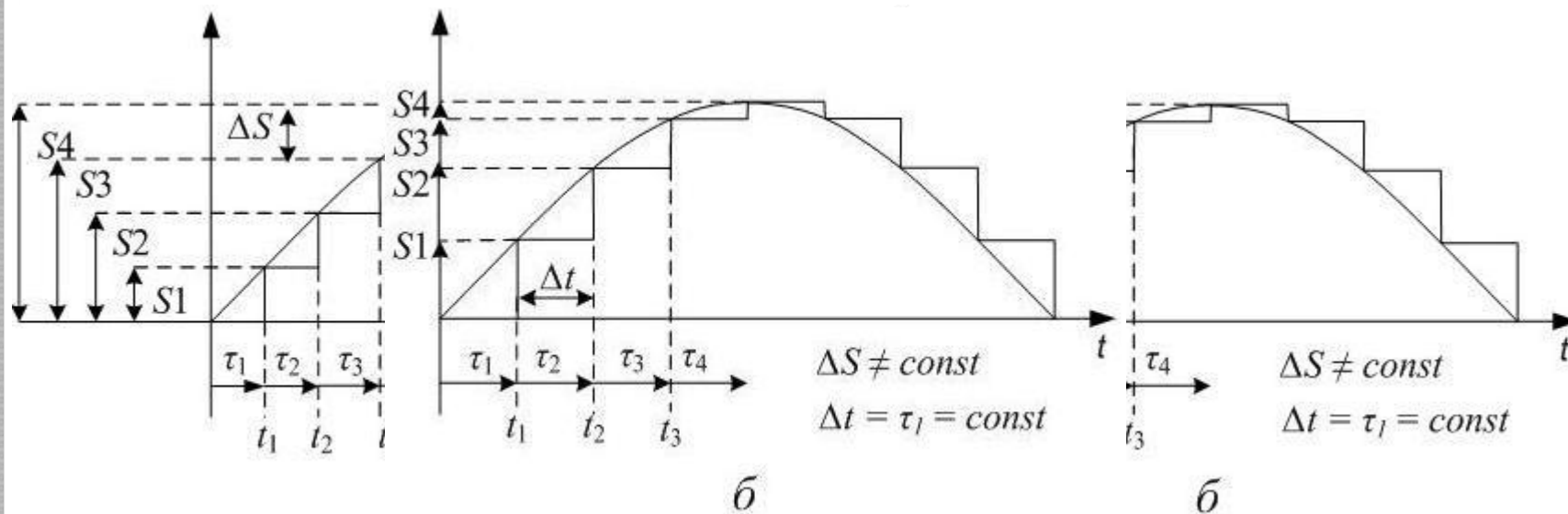
**Однако,**

**В МПСУ (ВП) дискретизацию непрерывной функции во времени совмещают с процессами, протекающими в объекте управления, – с периодом дискретности его работы.**

## 1.4.2. Ступенчатая аппроксимация синусоидального сигнала

$\Delta S = \text{const}$

$\Delta t = \text{const}$



● В силовых устройствах

● В системах управления

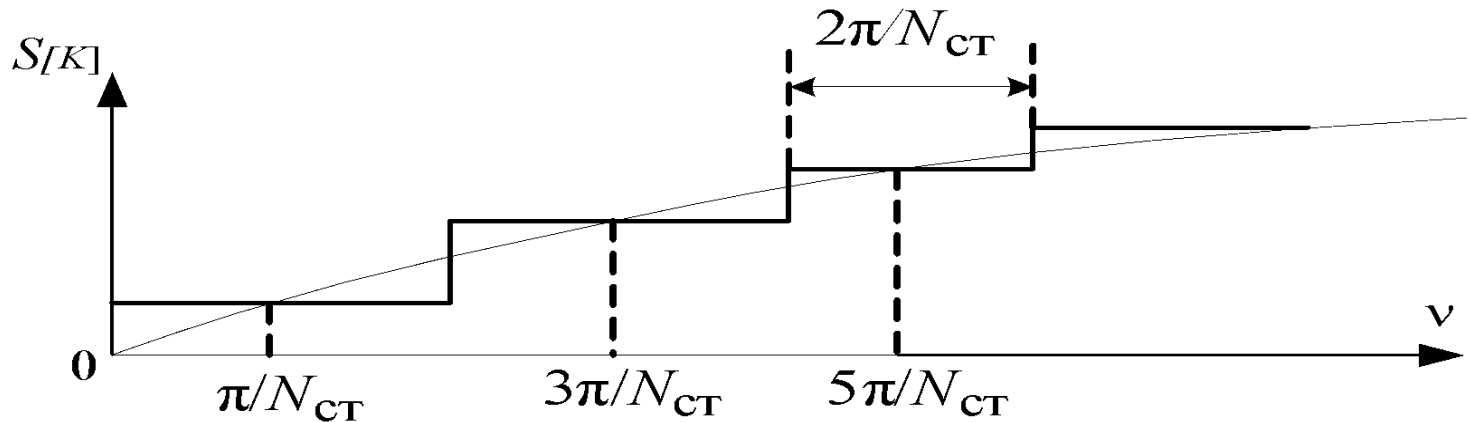
# Проблемы:

1. Первая гармоника ступенчатой функции может отличаться от исходного сигнала как по **фазе**, так и по **амплитуде**.
2. В спектре ступенчатой функции помимо основной гармоники присутствуют и **высокочастотные составляющие**.
3. Бесконечное число ступенек ( $N_{\text{ст}}$ ) **нереализуемо**.

## Как выбрать $N_{\text{ст}}$ ?

$$K_{\Gamma} = \left( \dots \right)^2 - 1$$

## Решение 1-ой проблемы:



$$N_{CT}, K = \overline{0, (N_{CT} - 1)}$$

$$\nu_0 = \pi / N_{CT}, \Rightarrow S_{[0]} = \sin \frac{\pi}{N_{CT}}$$

$$\nu_1 = \pi / N_{CT} + 2\pi / N_{CT} = 3\pi / N_{CT}, \Rightarrow S_{[1]} = \sin \frac{3\pi}{N_{CT}}$$

$$\nu_2 = 5\pi / N_{CT}, \Rightarrow S_{[2]} = \sin \frac{5\pi}{N_{CT}}$$

В общем виде выражение для амплитуды  $K$ -й ступени будет иметь вид:

$$S_{[K]} = \sin \frac{\pi}{N_{CT}} \cdot (2K + 1), \text{ где } K = \overline{0, (N_{CT} - 1)}$$



**Продолжение следует!**