

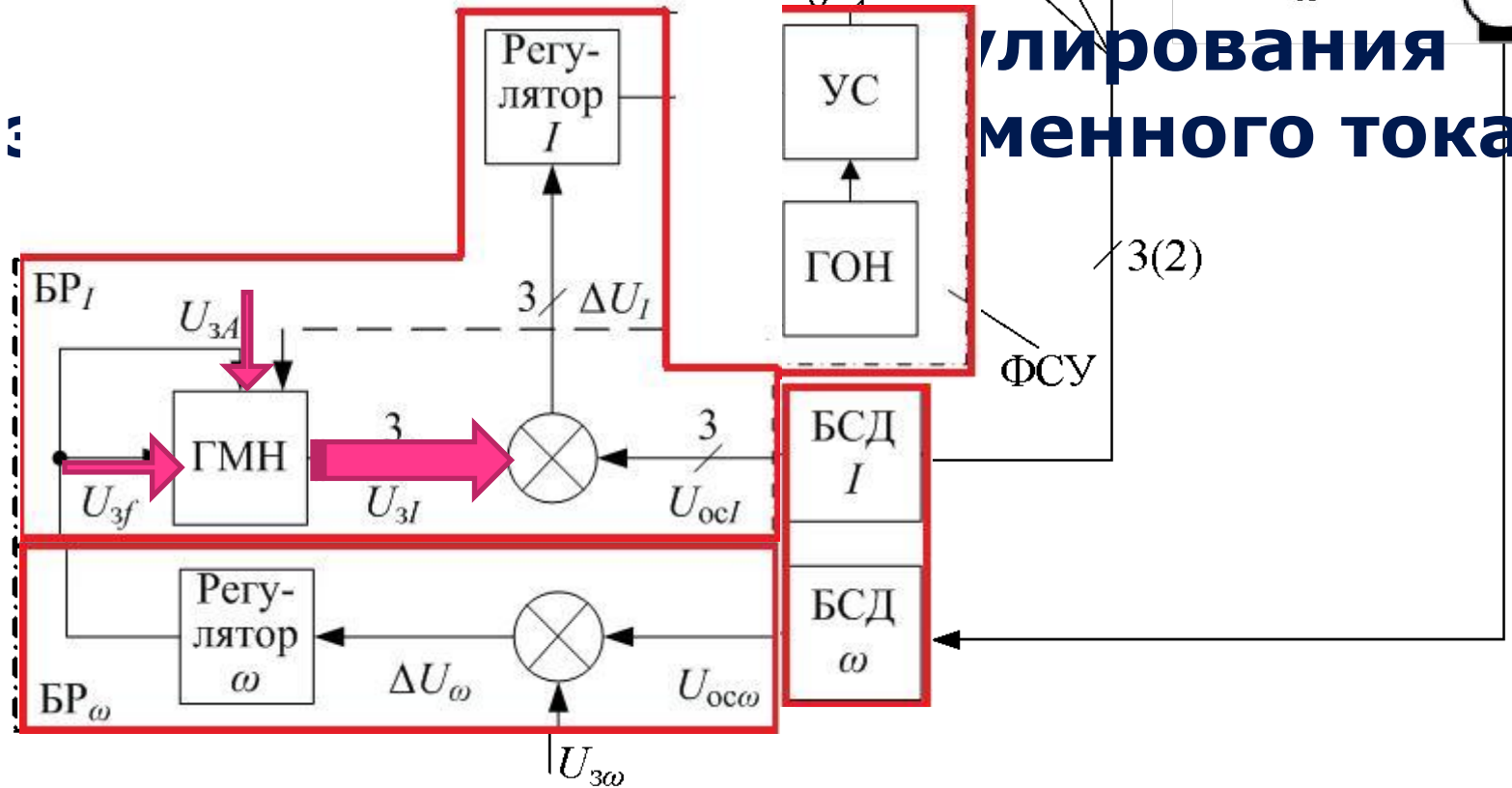
Микропроцессорные системы управления устройствами силовой электроники

Глава 1

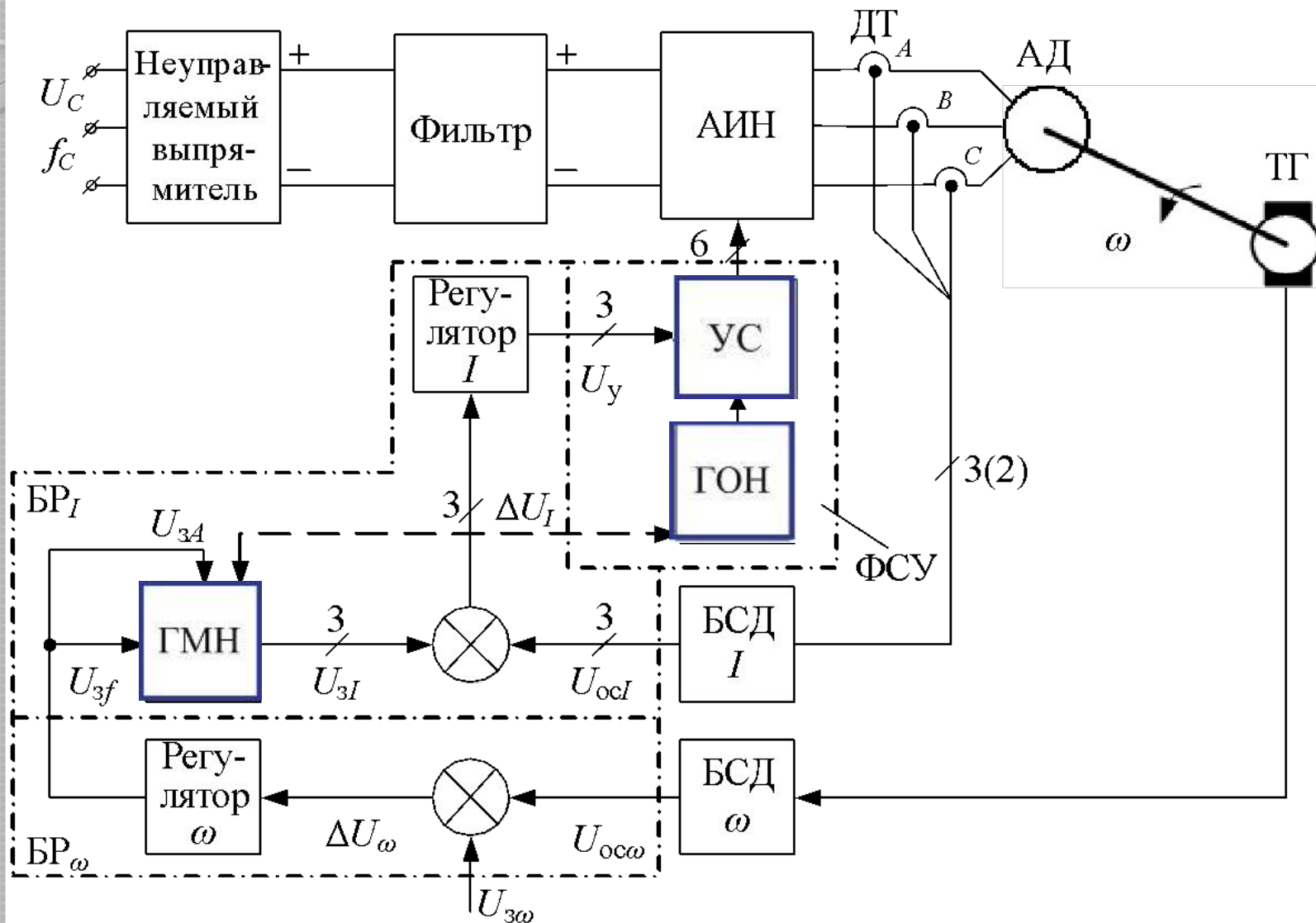
МПСУ Автономными инверторами напряжения



1.1. Типовая структура системы регулирования тока



Типовая структура системы автоматического регулирования электроприводом переменного тока



Программная часть системы управления

Отличия электропривода переменного тока

- **ГМН** — самый быстрый **ГОИ** — как **трехф** **УС**
- В системе управления **ГОИ** — три формы **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.

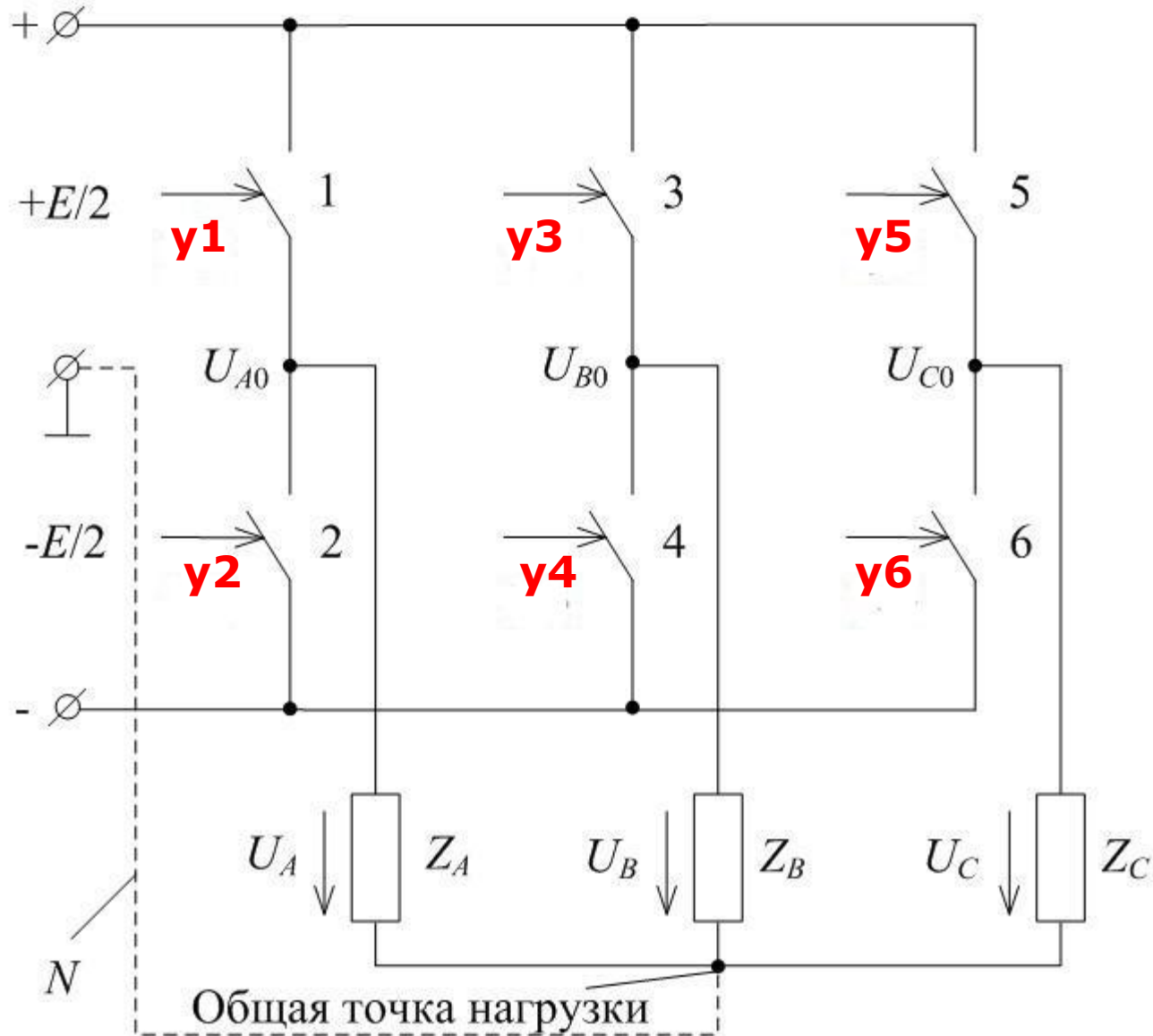
Поэтому МПСУ АИН появились гораздо позже, чем МПСУ УВ

1.2.1. Коммутационная модель АИН

И. А. Баховцев



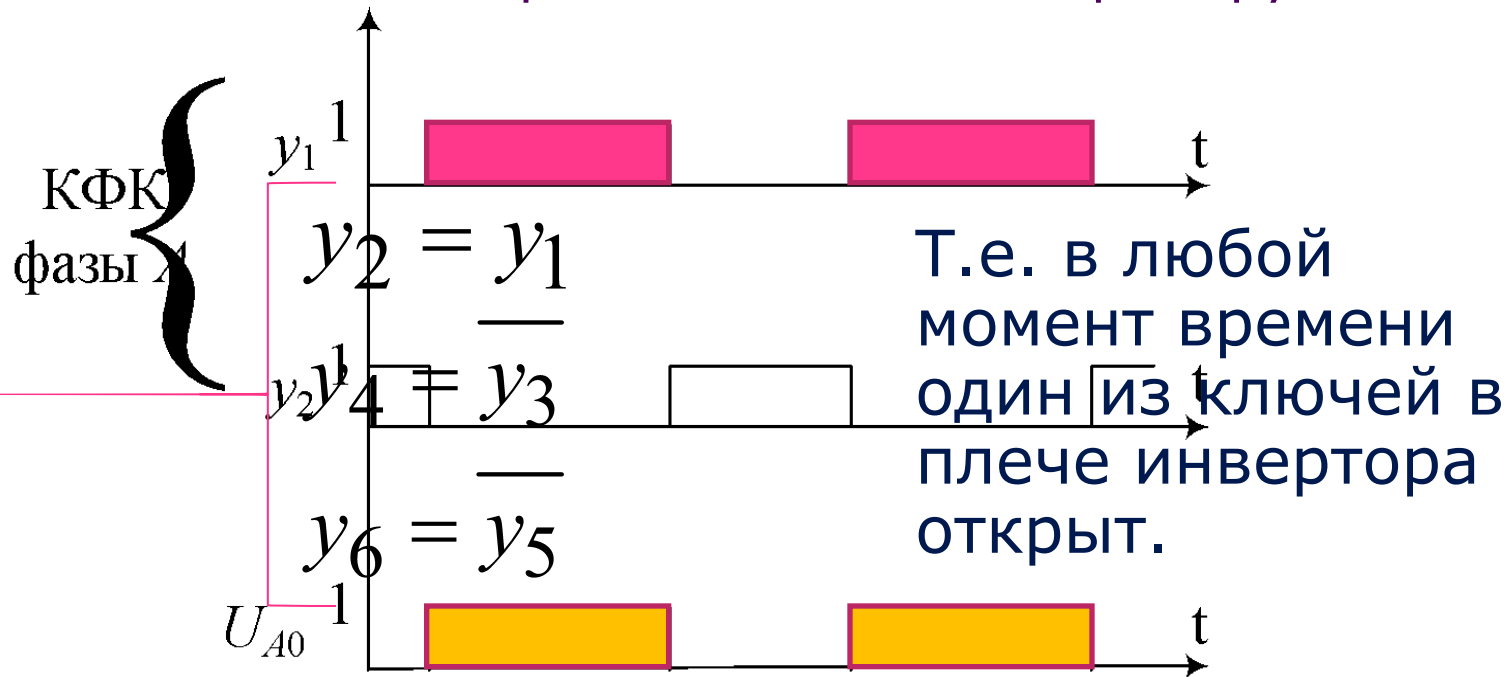
Коммутационная модель АИН



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

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

ШИМ



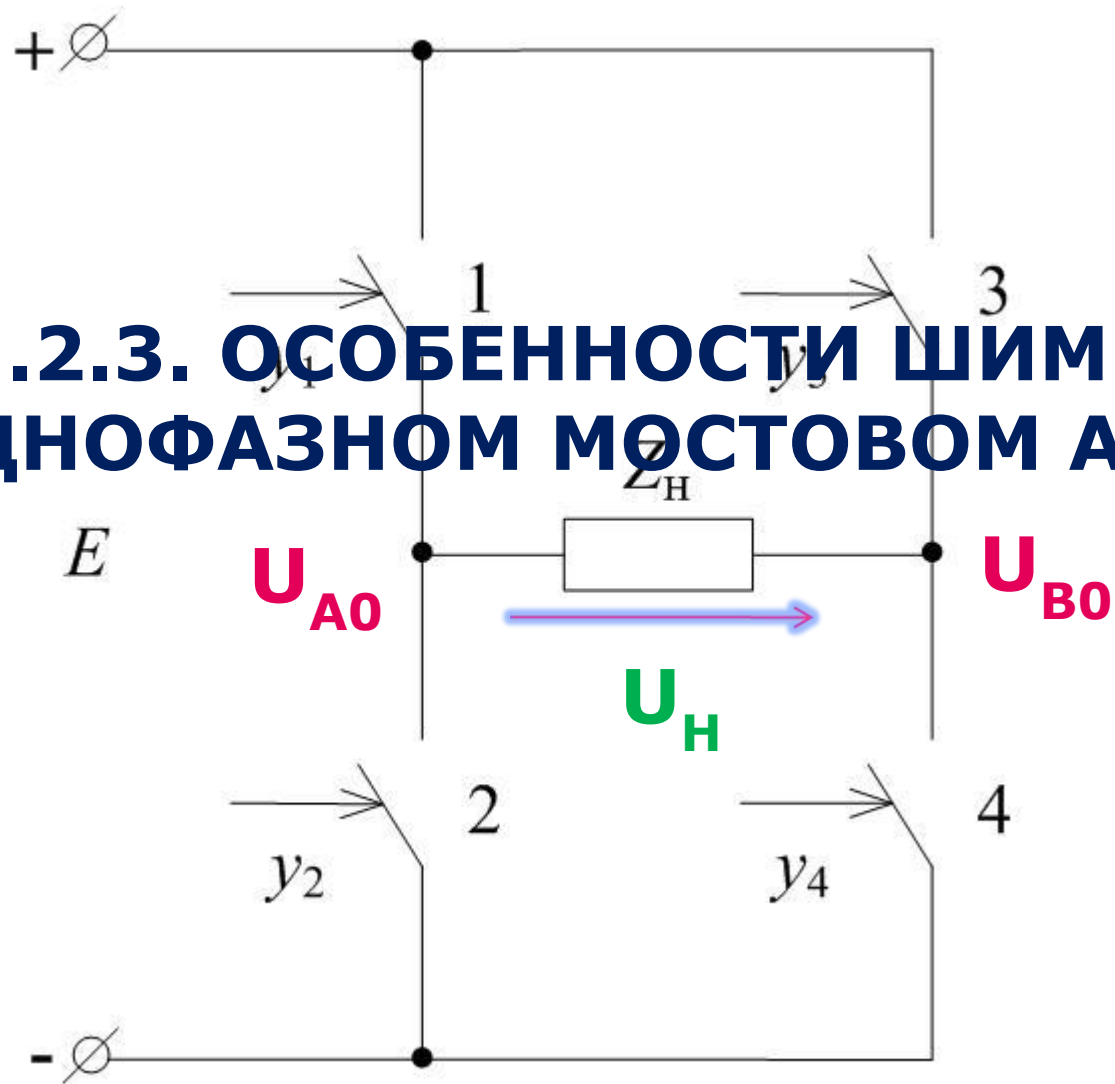
Опорный
сигнал

Модулирующий
Векторные
сигнал
способы

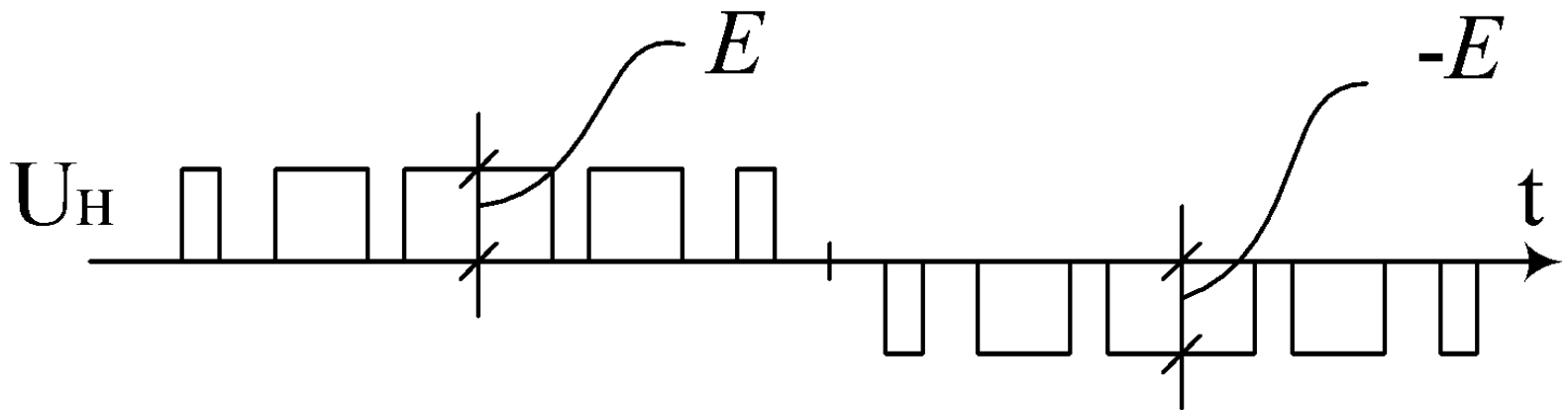
Форма модулирующего сигнала (тип ШИМ)	Внешний вид модулирующего сигнала	Качество выходного напряжения	Линейный диапазон регулировочной характеристики
<ul style="list-style-type: none"> ● Прямоугольная (-/-ШИМ, ШИР) 		Неудовлетворительное	Максимальный
<ul style="list-style-type: none"> ● Треугольная (-/ШИМ)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

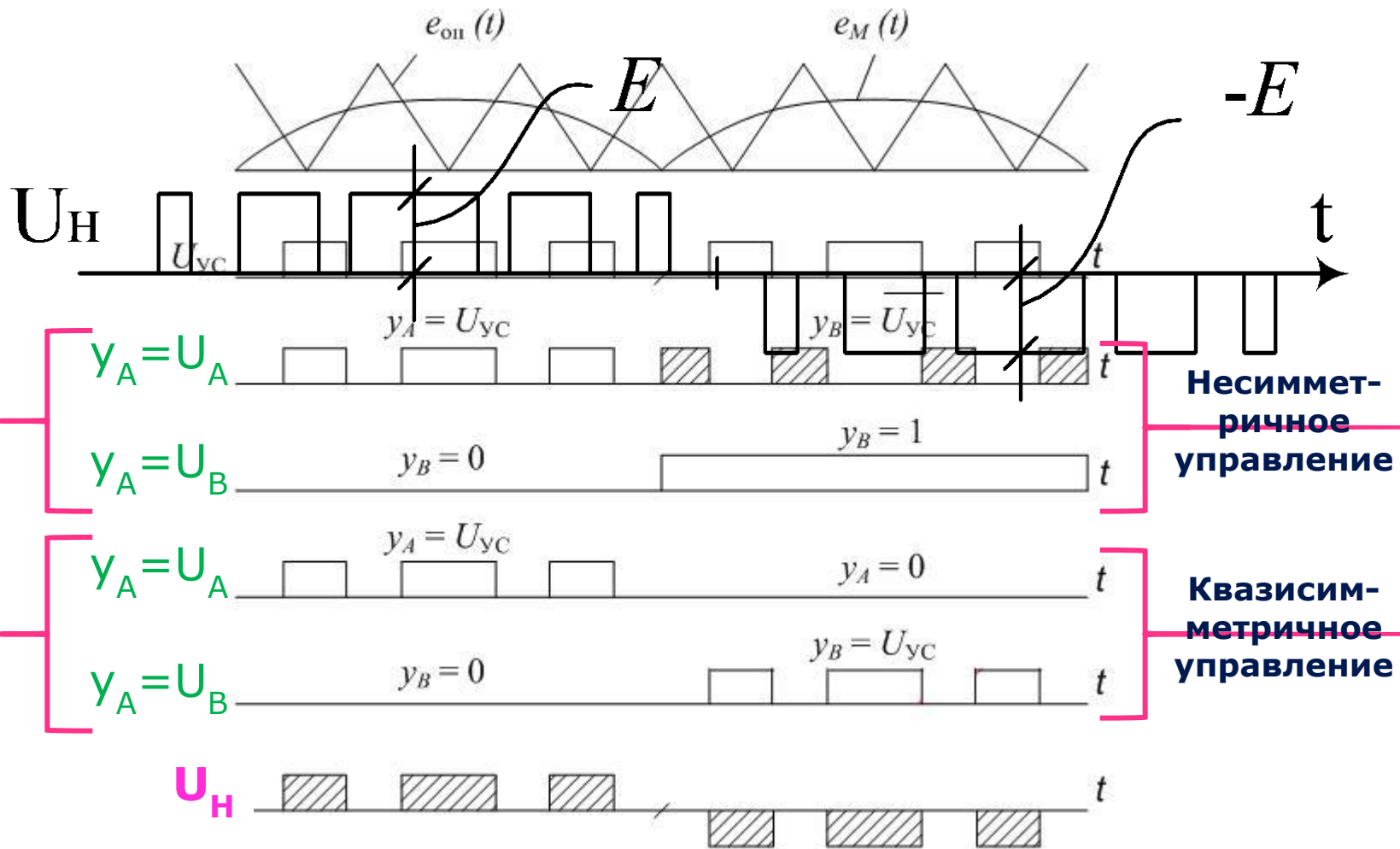


- Данное выходное напряжение можно реализовать тремя алгоритмами управления:
- **Симметричным**
- **Несимметричным**
- **Квазисимметричным**

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.

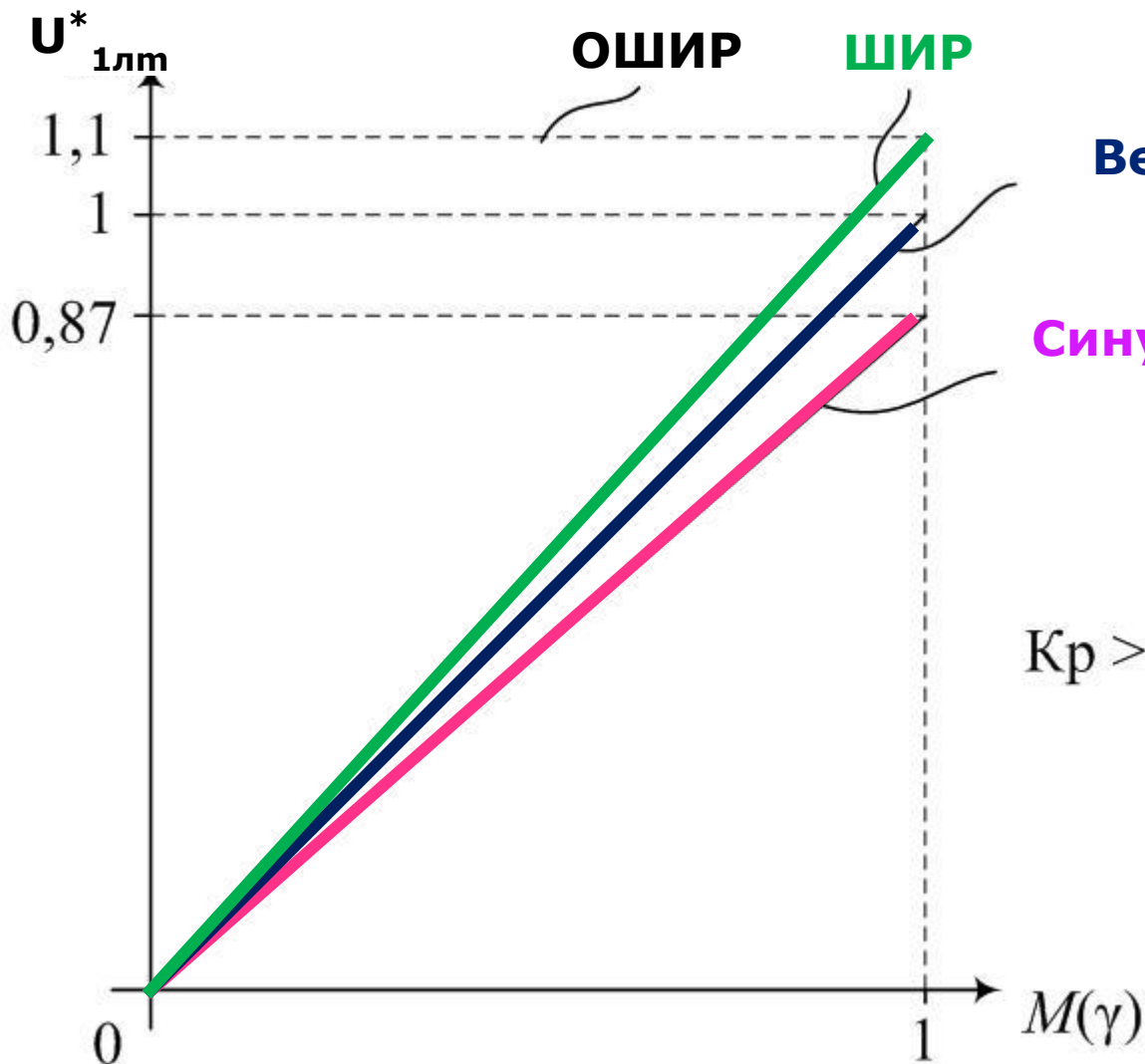
Зависимость амплитуды первой гармоники выходного напряжения от глубины модуляции называется **регулирующей характеристикой АИИ**.

Глубина модуляции подобна коэффициенту заполнения γ , характеризующему широтно-импульсное регулирование (ШИР):

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

Регулировочные характеристики АИН

№ п/п	«с»
1	U_{1c}
2	$U_{1л}$



Векторная ШИМ, $64E\gamma$

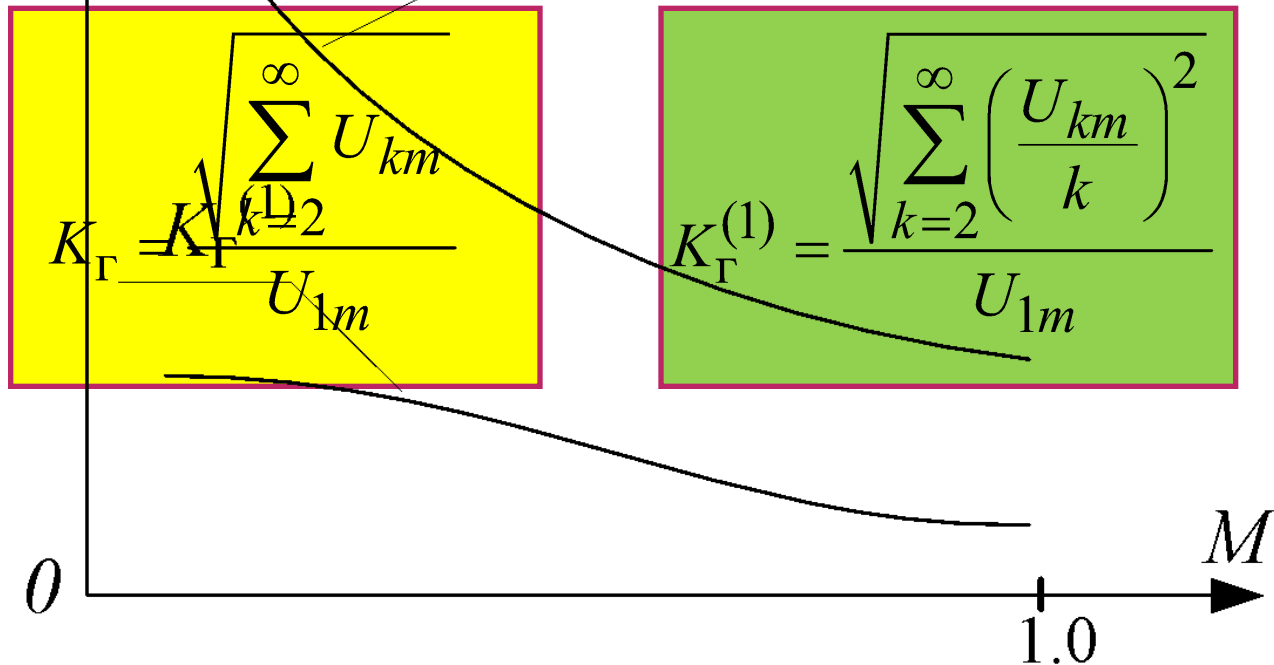
Синусоидальная ШИМ $\bar{U} = 1,1E\gamma$

$K_p > 10$

$U^*_{1лм}$ – 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

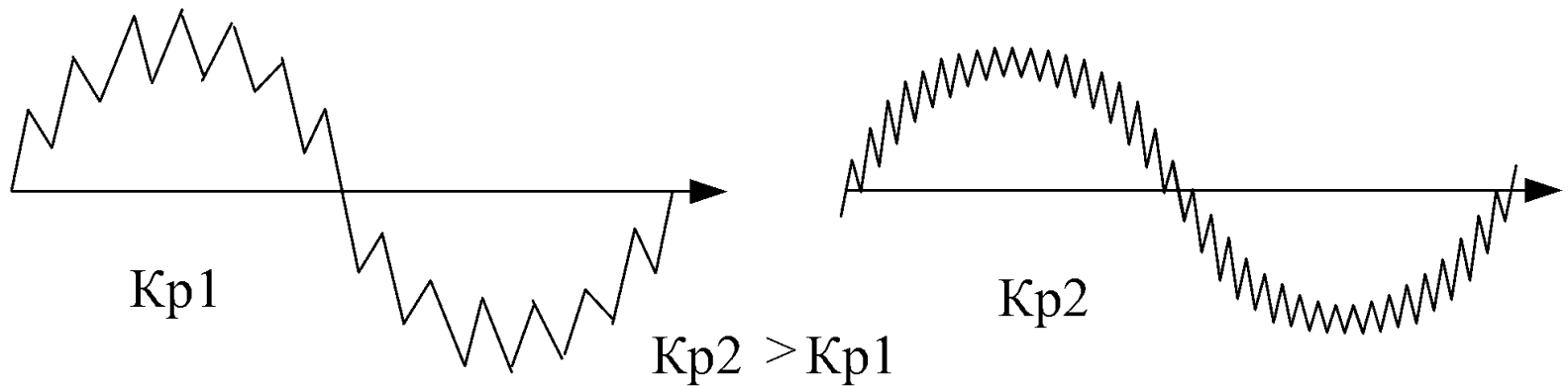
2. Кратность частот опорного и модулирующего сигналов

● 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.

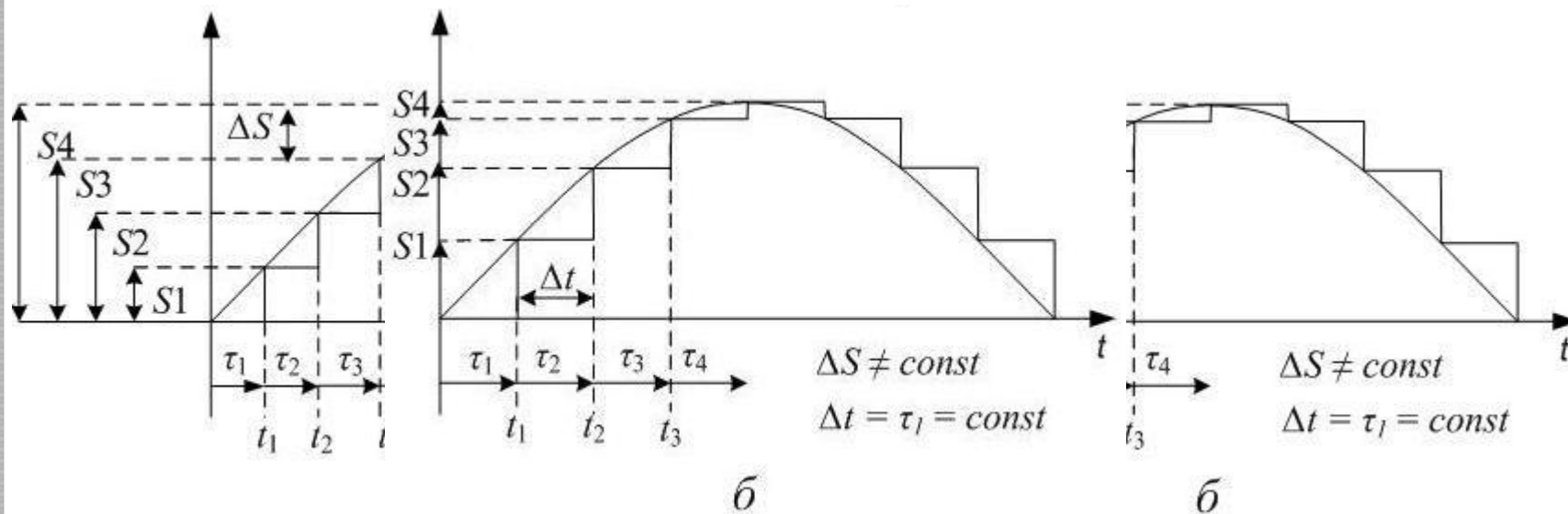
Однако,

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

$\Delta S = \text{const}$

$\Delta t = \text{const}$



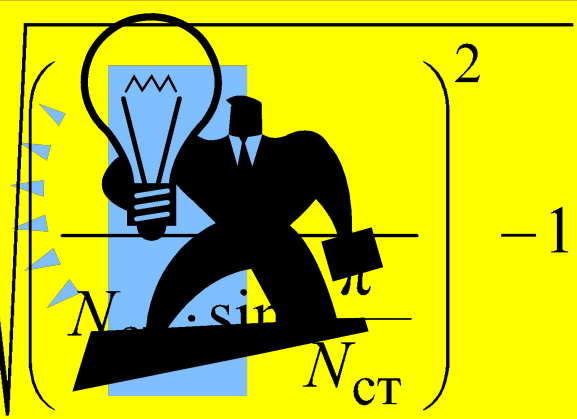
● В силовых устройствах

● В системах управления

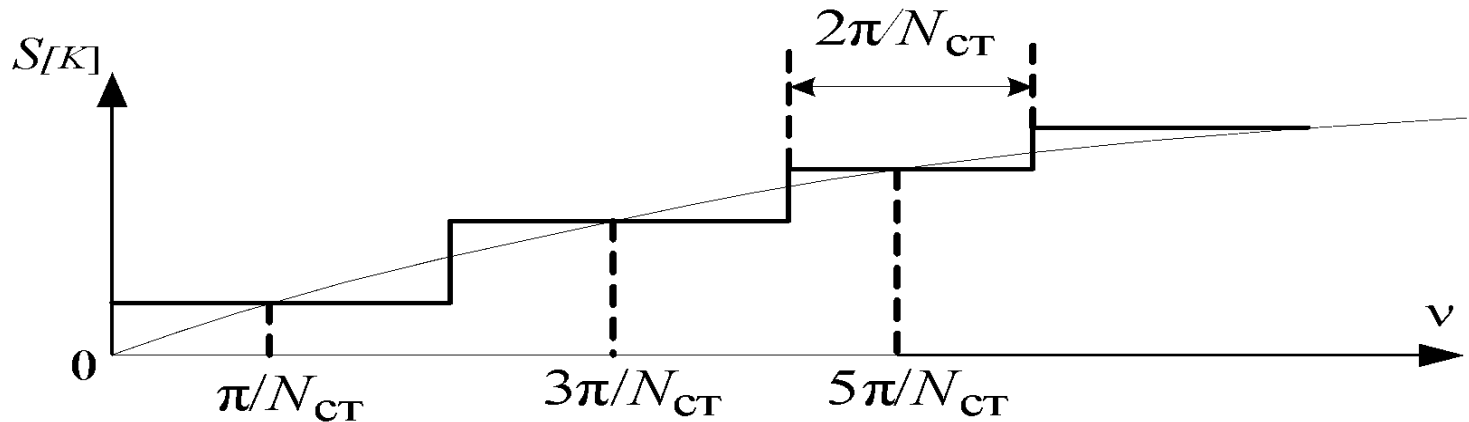
Проблемы:

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 $N_{\text{ст}}$?


$$K_{\Gamma} = \left(\frac{N \cdot \sin \frac{\pi}{N_{\text{ст}}}}{N_{\text{ст}}} \right)^2 - 1$$

Решение 1-ой проблемы:



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

$$v_0 = \pi / N_{CT}, \Rightarrow S_{[0]} = \sin \frac{\pi}{N_{CT}}$$

$$v_1 = \pi / N_{CT} + 2\pi / N_{CT} = 3\pi / N_{CT}, \Rightarrow S_{[1]} = \sin \frac{3\pi}{N_{CT}}$$

$$v_2 = 5\pi / N_{CT}, \Rightarrow S_{[2]} = \sin \frac{5\pi}{N_{CT}}$$

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!