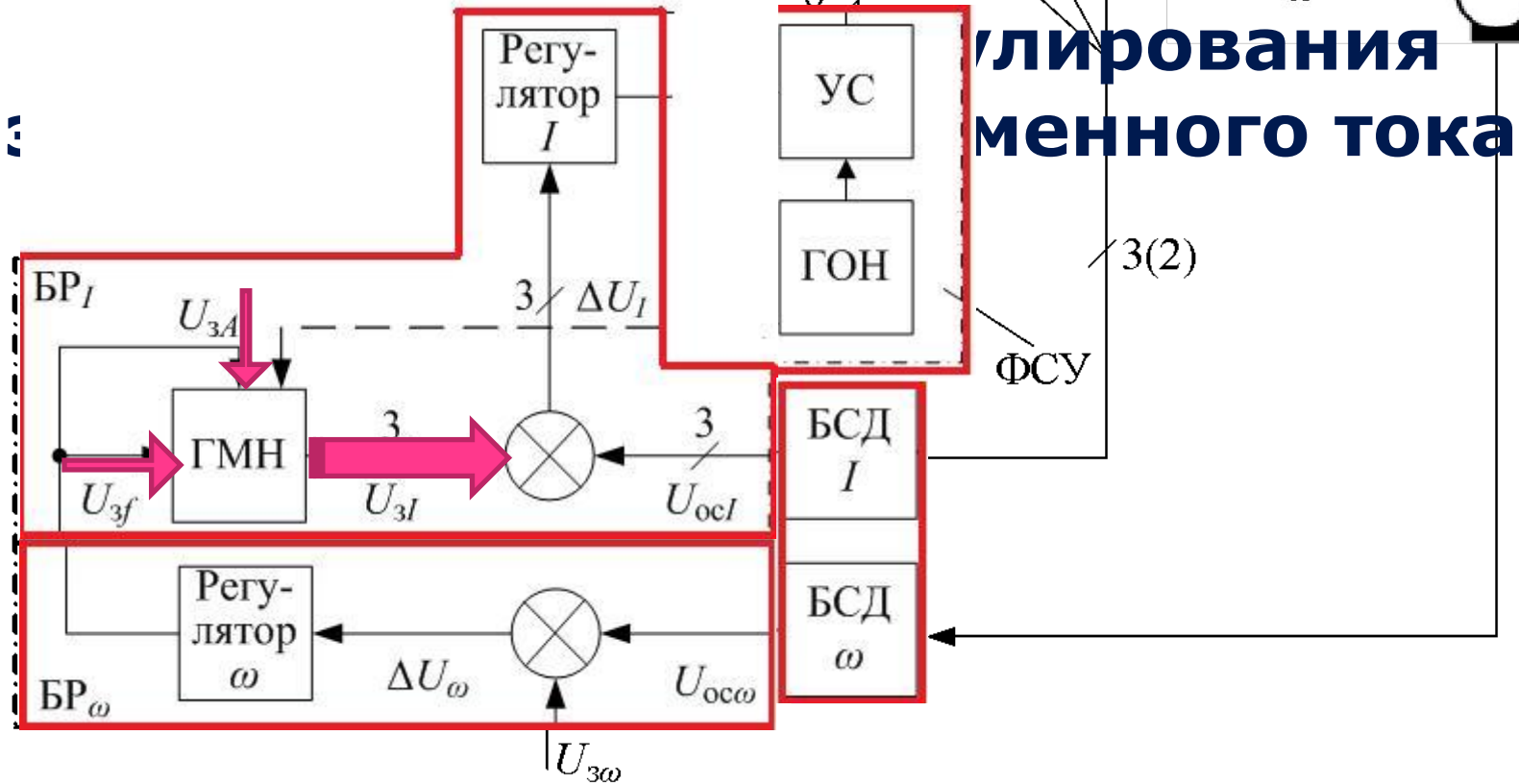
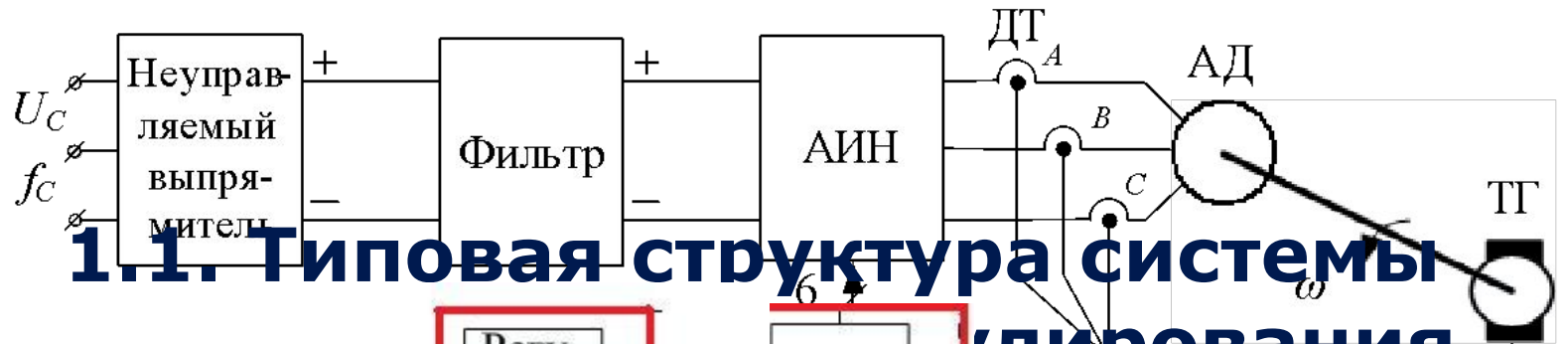


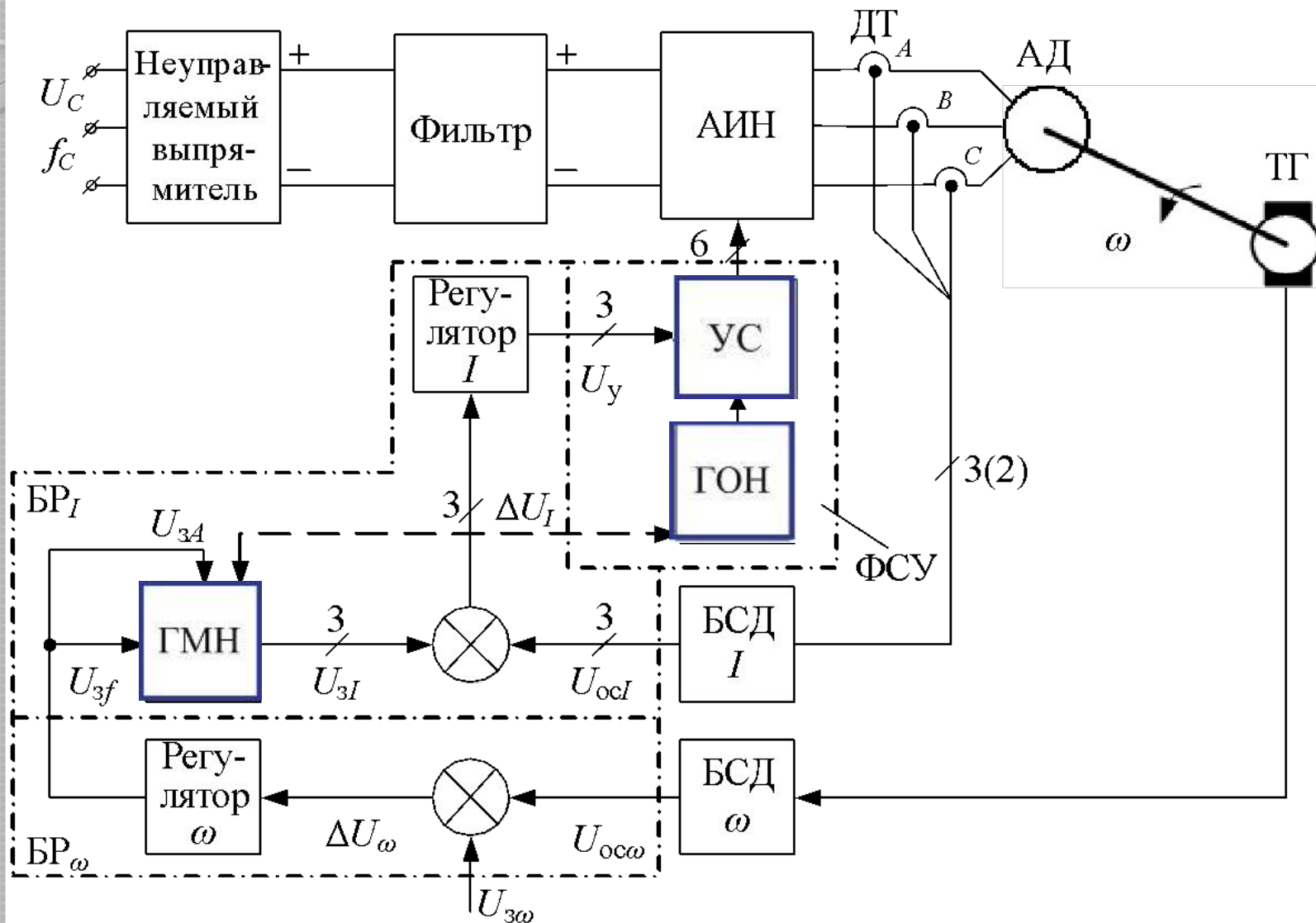
Микропроцессорные системы управления устройствами силовой электроники

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 за **УС**
- 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.

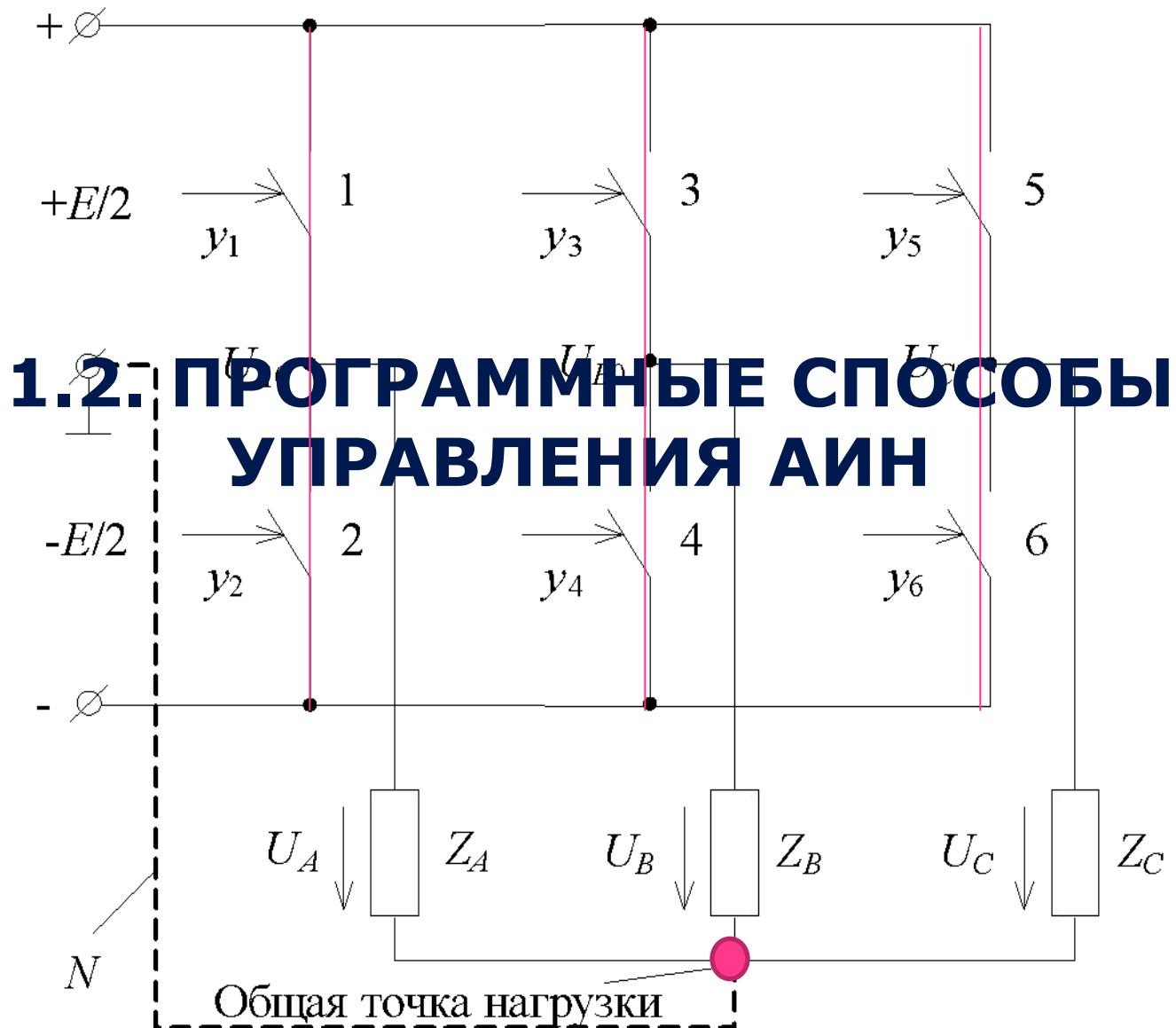
Вывод: Микропроцессор МПСУ АИН
должен обладать:

- 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

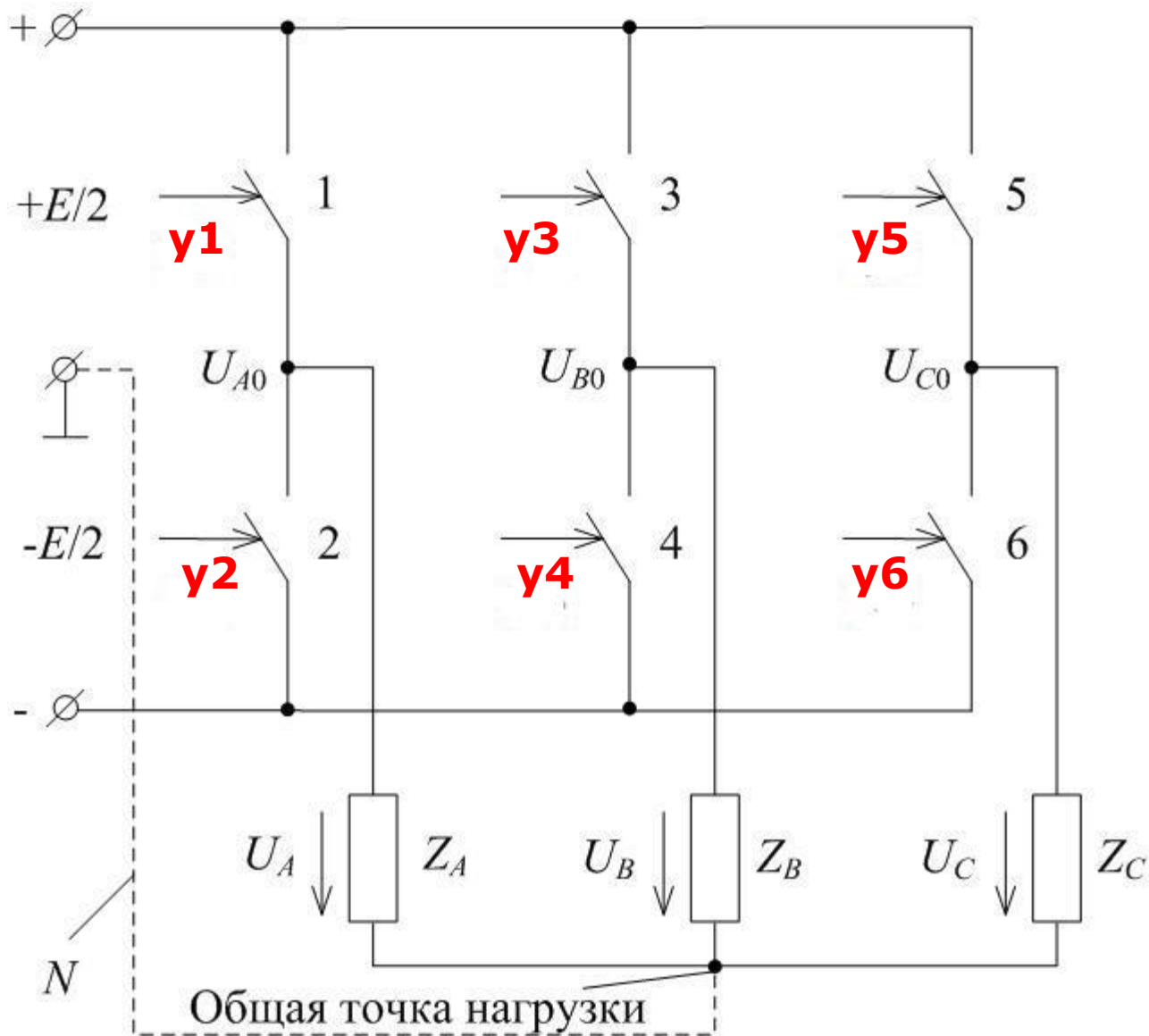
1.2.1. Коммутационная модель АИН

И. А. Баховцев



1.2.2. ПРОГРАММНЫЕ СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ АИН

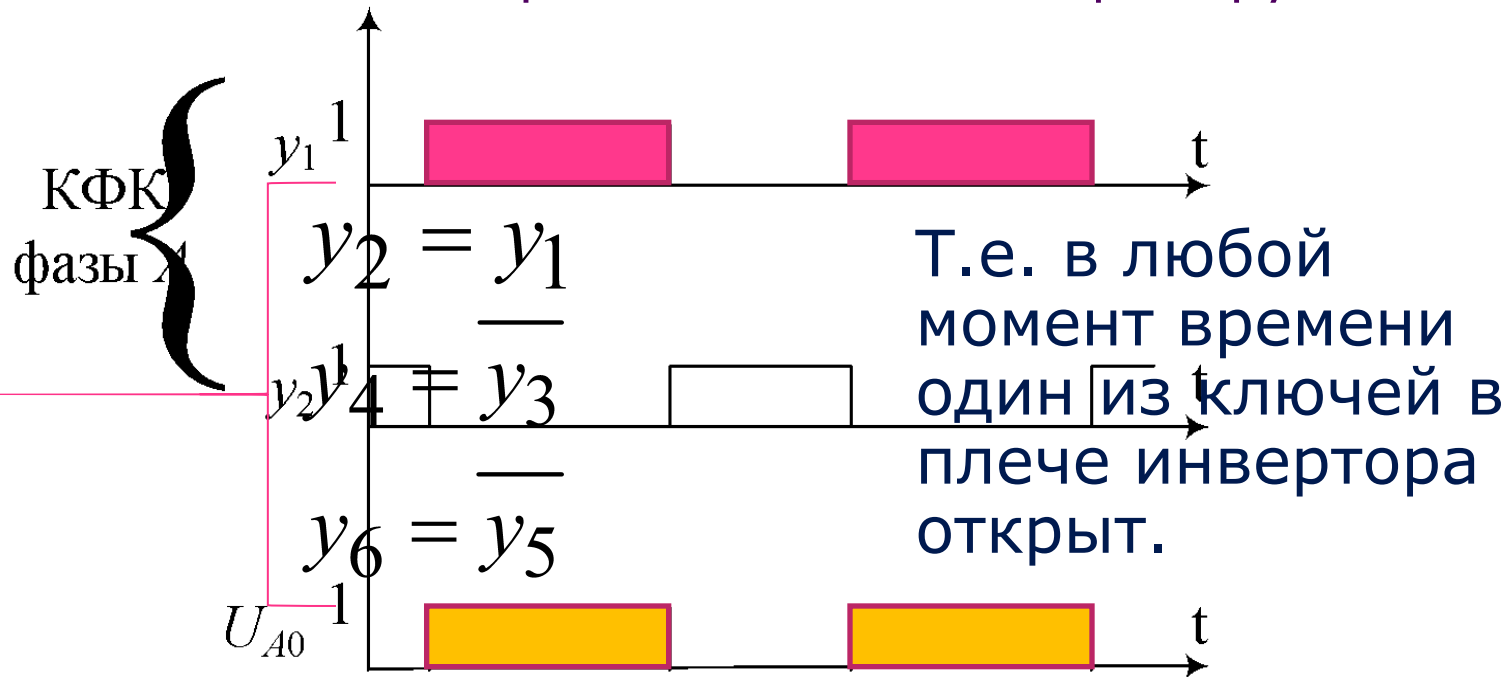
Коммутационная модель АИН



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.



1.2.2. Виды широтно-импульсной модуляции

- Задавая требуемые длительности импульсов управления ключами (и изменение этих длительностей во времени), можно управлять качеством выходной, входной энергии АИН и его внутренними характеристиками



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



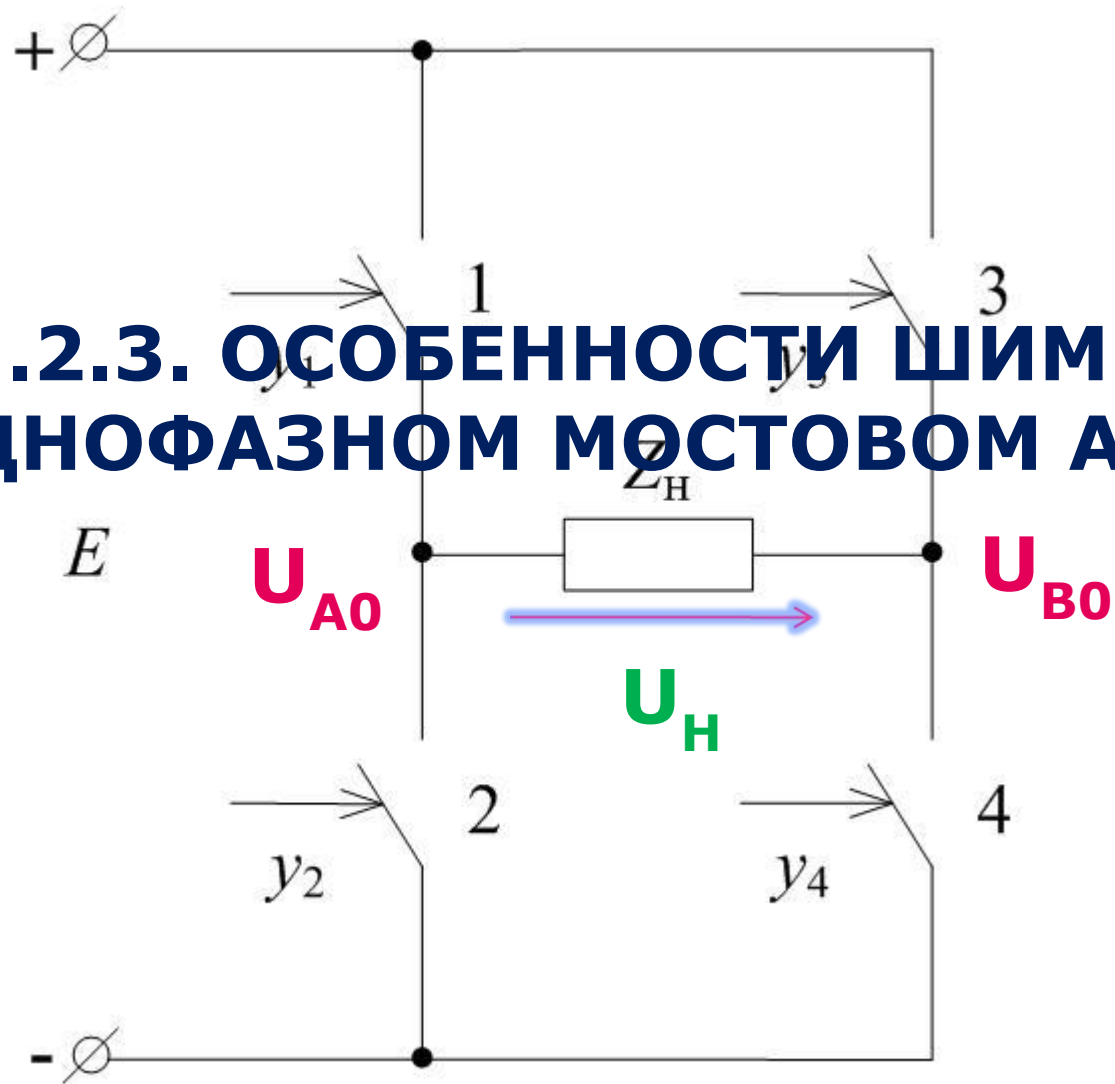
Опорный
сигнал

Модулирующий
Векторные
сигнал
способы

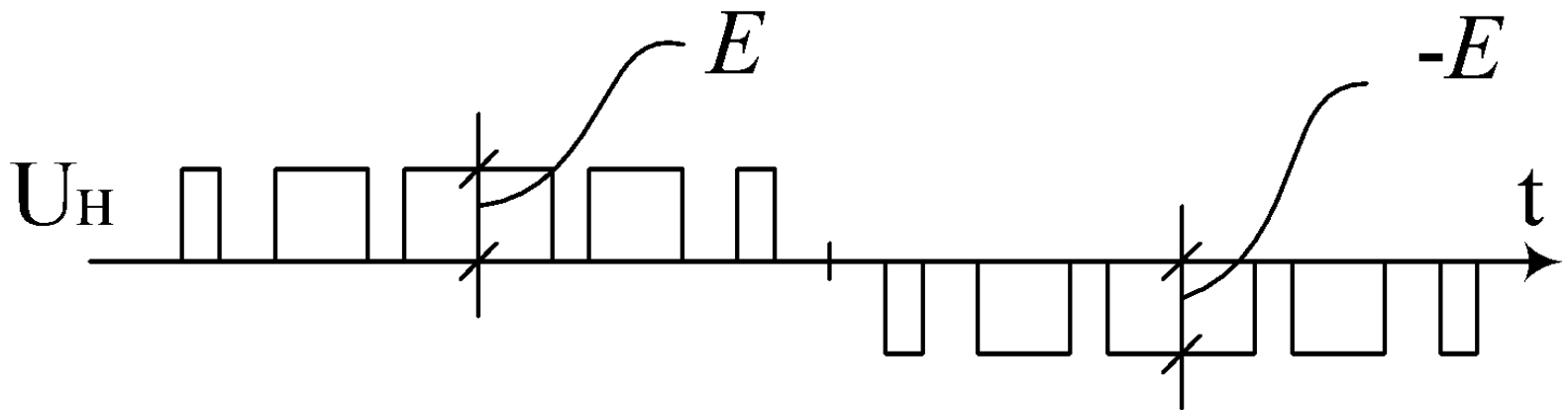
Форма модулирующего сигнала (тип ШИМ)	Внешний вид модулирующего сигнала	Качество выходного напряжения	Линейный диапазон регулировочной характеристики
<ul style="list-style-type: none"> ● Прямоугольная (-/-ШИМ, ШИР) 		Неудовлетворительное	Максимальный
<ul style="list-style-type: none"> ● Треугольная (-/ШИМ) 		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 информации (-/-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

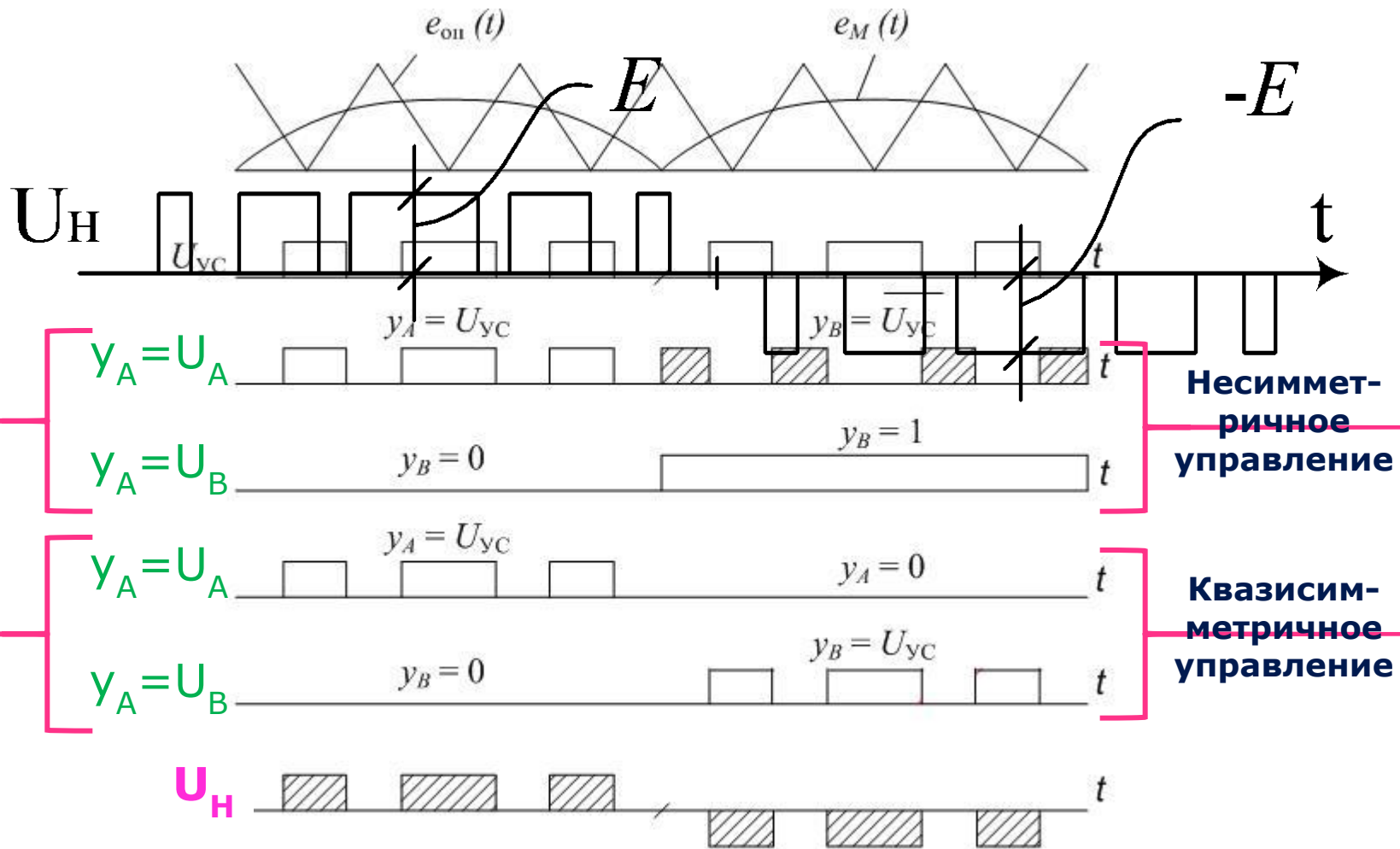


- Данное выходное напряжение можно реализовать тремя алгоритмами управления:
- **Симметричным**
- **Несимметричным**
- **Квазисимметричным**

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.

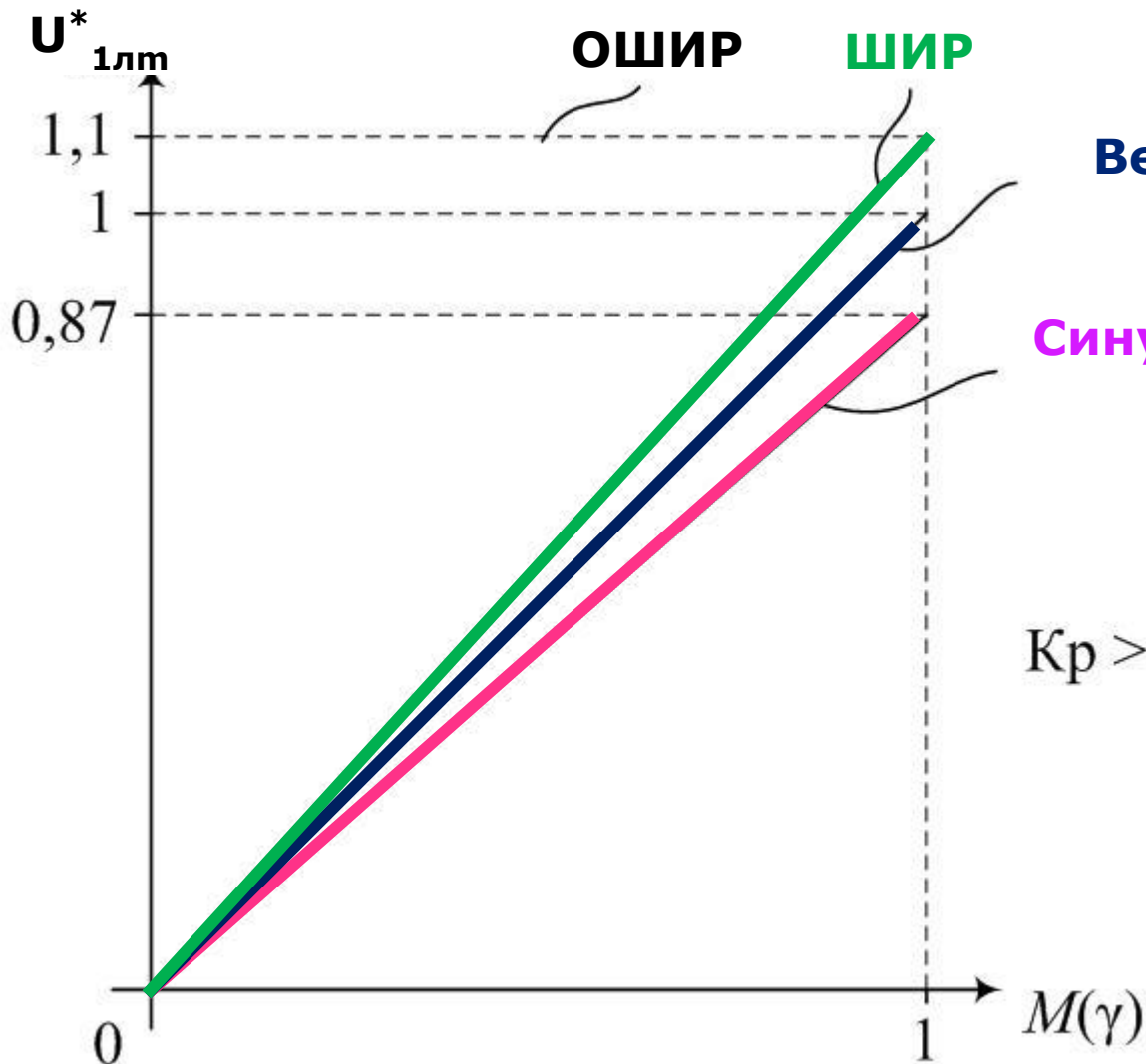
Зависимость амплитуды первой гармоники выходного напряжения от глубины модуляции называется **регулирующей характеристикой АИИ**.

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	$U_{1л}$



ления

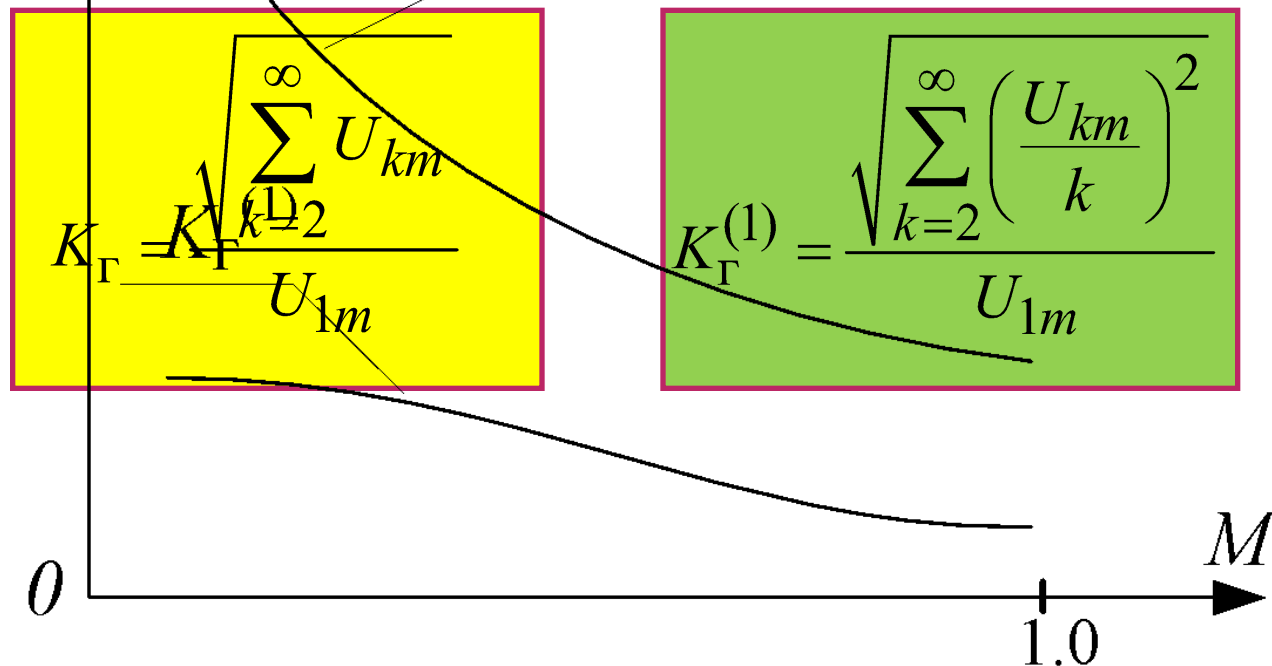
Векторная ШИМ, $64E\gamma$

Синусоидальная ШИМ, $1,1E\gamma$

$U^*_{1лм}$ – 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

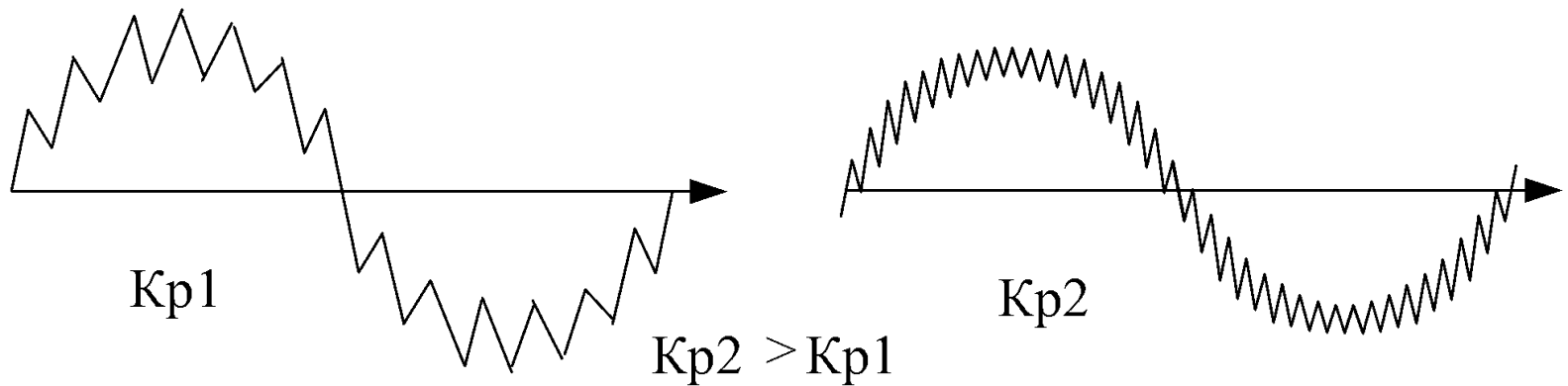
2. Кратность частот опорного и модулирующего сигналов

● 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.

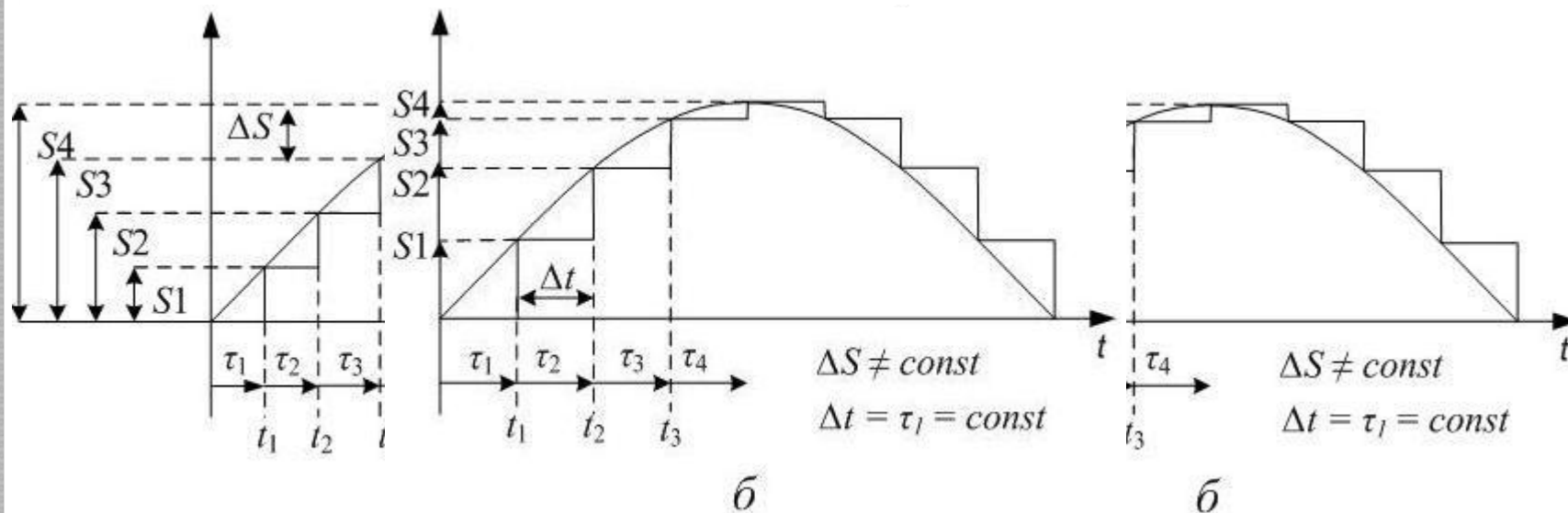
Однако,

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

$\Delta S = \text{const}$

$\Delta t = \text{const}$



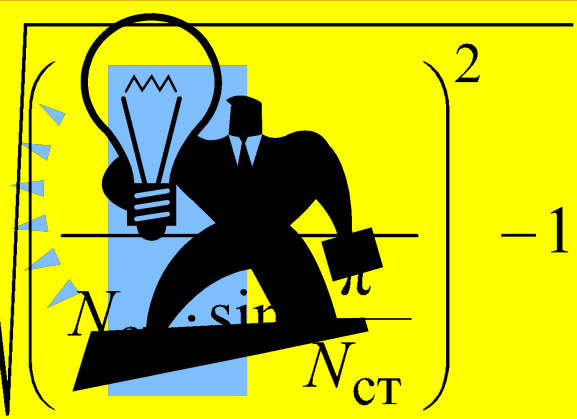
● В силовых устройствах

● В системах управления

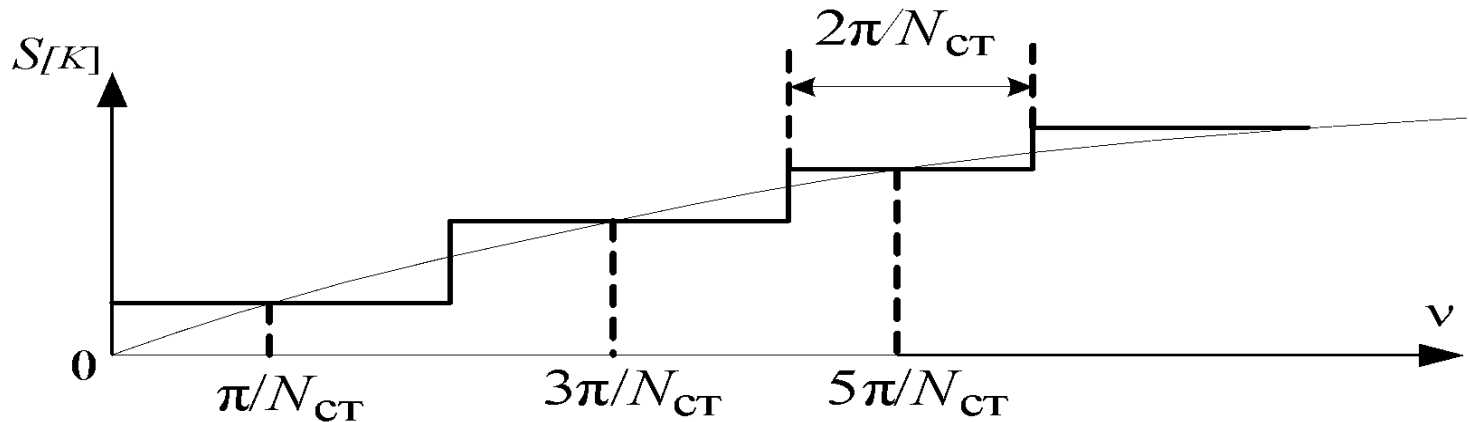
Проблемы:

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 $N_{\text{ст}}$?


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

Решение 1-ой проблемы:



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

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

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

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

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!