Новосибирский Государственный Технический Университет
Факультет Радиотехники, Электроники и Физики

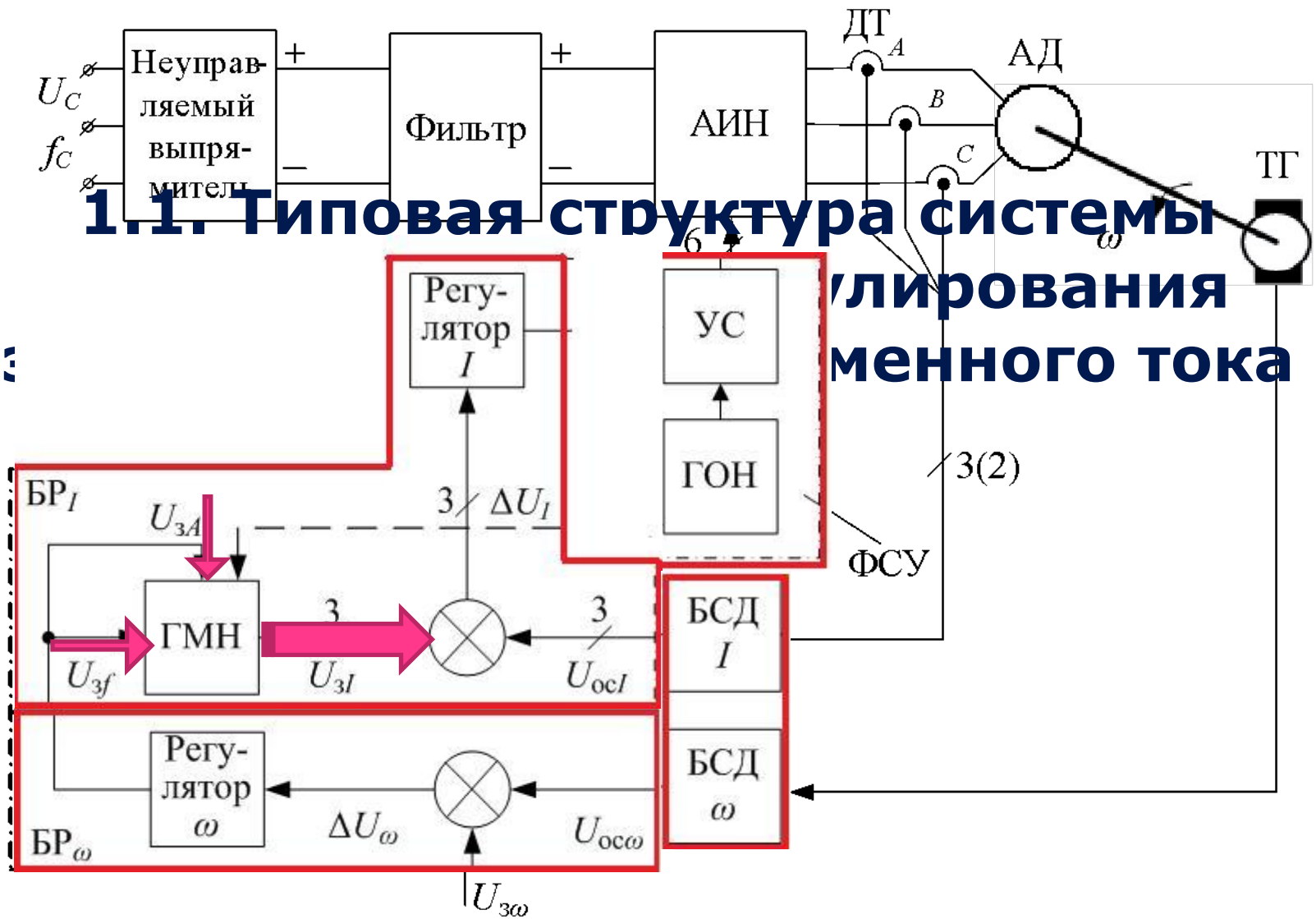
И. А. Баховцев

# Микропроцессорные системы управления устройствами силовой электроники

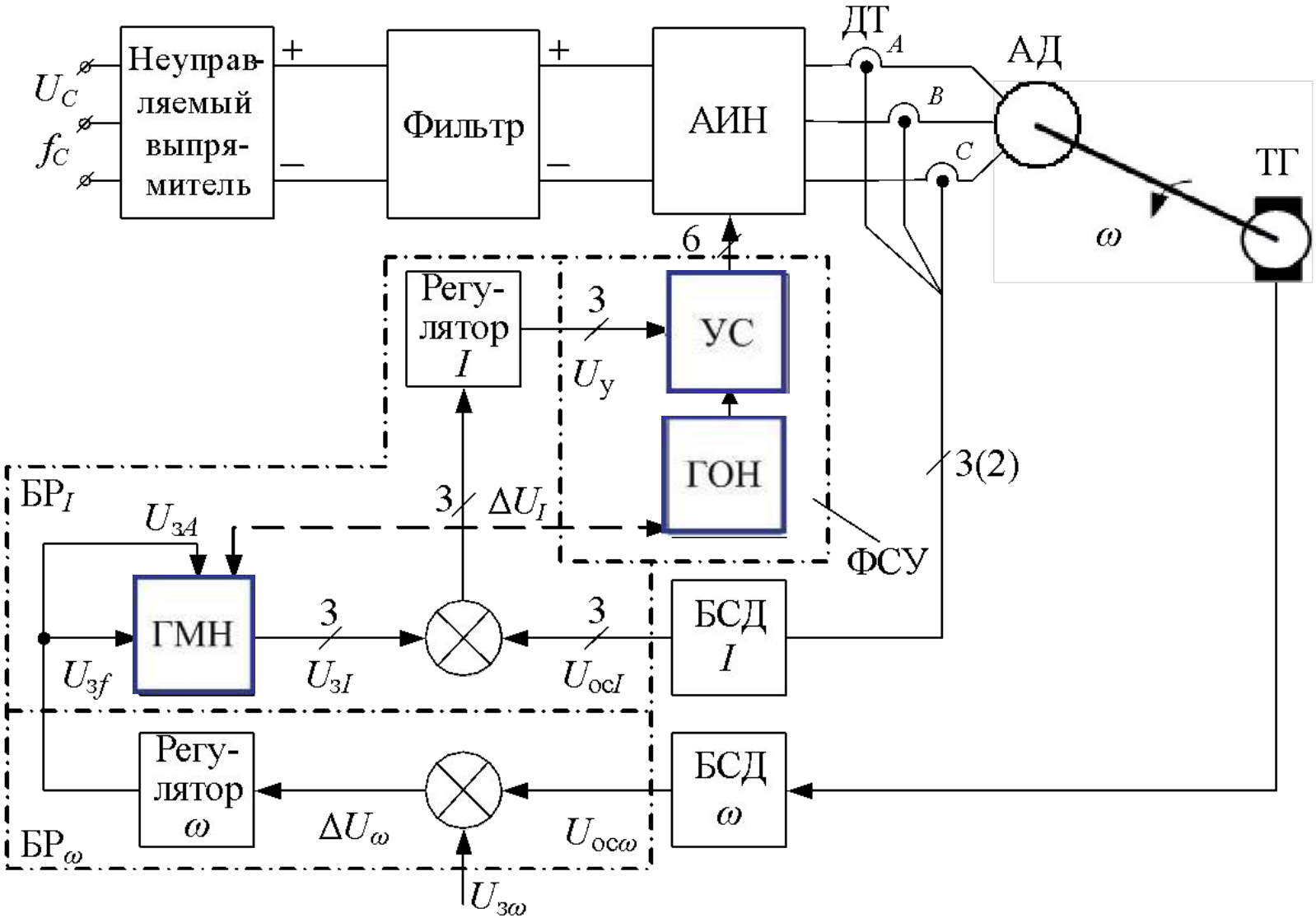
Глава 1

МПСУ Автономными инверторами напряжения

# 1.1. Типовая структура системы
# ...улирования
# ...менного тока



# Типовая структура системы автоматического регулирования электроприводом переменного тока



# Программная часть системы управления

ГМН + ГОН + УС

## Отличия электропривода переменного тока

- Б[illegible]й быстрый [illegible]ка **трехф**[illegible]
- Б[illegible] управлени[illegible]ени форми[illegible]**ва 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**
- Частота опорного сигнала в системе управления АИН, как правило, значительно **больше 300 Гц**
- Для управления двигателями переменного тока используются прежде всего законы частотного управления:

$U/f = const$ **при постоянном моменте нагрузки**

$U/\sqrt{f} = const$ **при постоянной мощности**

$U/f^2 = const$ **при вентиляторном моменте нагрузки**

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

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

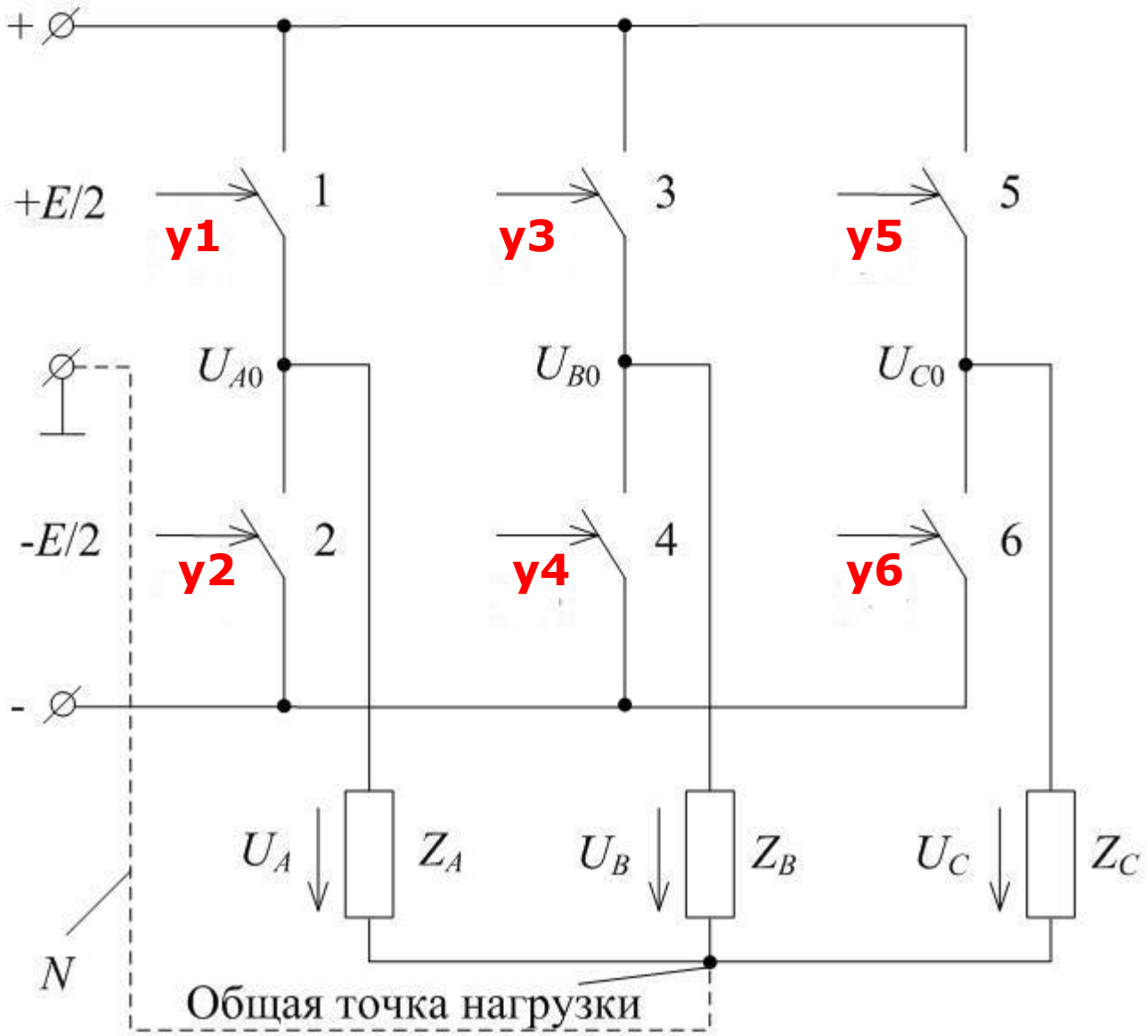
- разрядностью не менее **16 бит;**
- тактовой частотой не менее **50 МГц**, для обеспечения производительности десятки - сотни MIPS.

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

# 1.2.1. Коммутационная модель АИН

# 1.2. ПРОГРАММНЫЕ СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ АИН

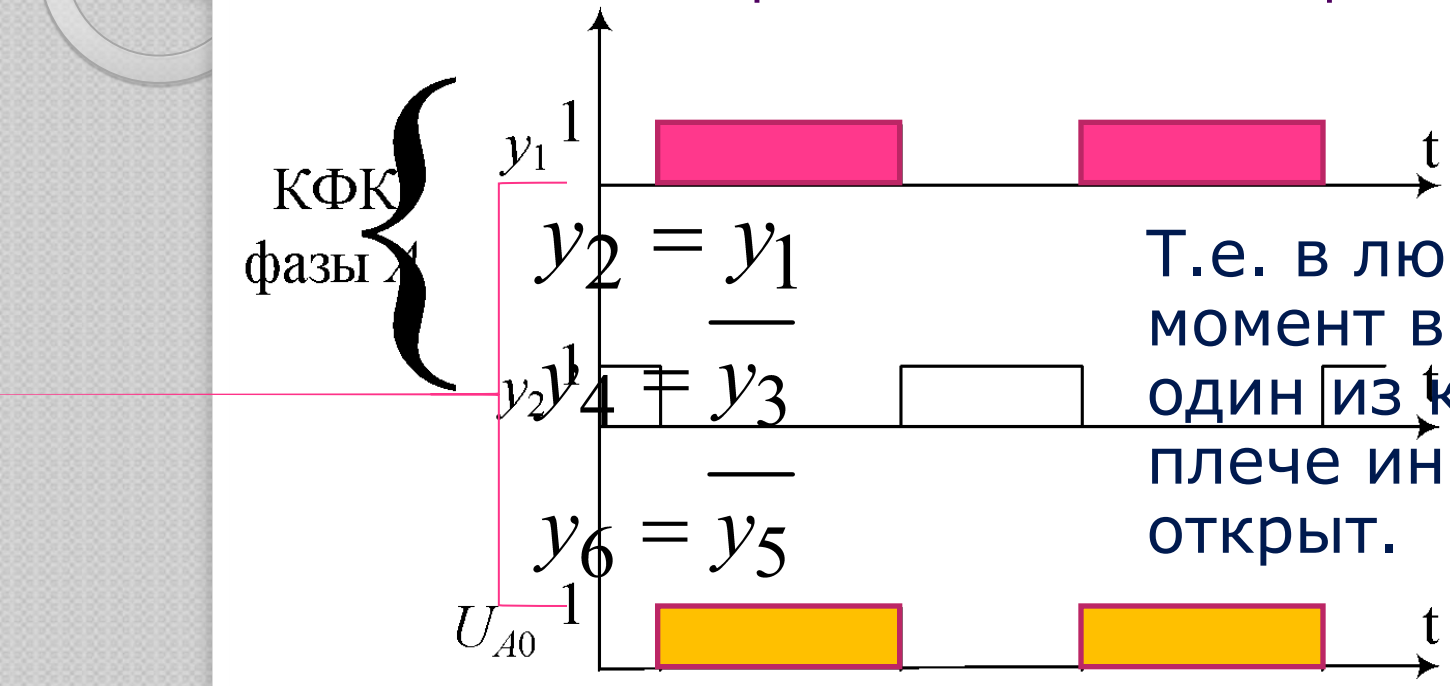
# Коммутационная модель АИН




Коммутационные функции ключей (КФК)

# Комплементарный режим управления

Это - необходимое условие независимости формы выходного напряжения АИН от cosφ нагрузки:




Т.е. в любой момент времени один из ключей в плече инвертора открыт.

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

# Коммутационные функции фаз

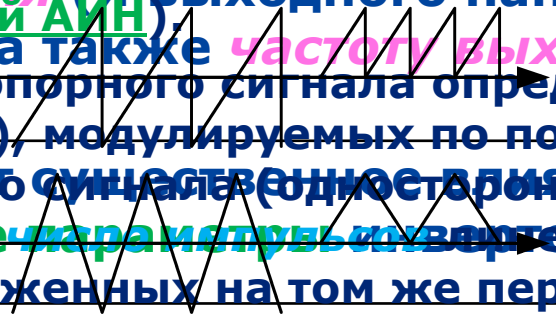
- $y_1 = y_A$
- $y_3 = y_B$
- $y_5 = y_C$

**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 | Регулировочная характе-ристика | *L* |
|---|---|---|---|---|
| Пилообразная |  | Односторонняя ШИМ | Линейная | 1 |
| Треугольная | | Двусторонняя ШИМ | Линейная | 2 |
| Нелинейная (синусоида, экспонента.) | | Двусторонняя ШИМ | Нелинейная | 2 |

- **определяет закон изменения длительности импульсов (т.е. *частоту коммутации вентилей АИН*) и выходного напряжения АИН) во времени, а также *частоту выходного напряжения*.**
- **форма опорного сигнала определяет *число фронтов* (один или два), модулируемых по положению на периоде опорного сигнала (односторонняя или двусторонняя ШИМ).**
- **оказывает существенное влияние на *входные и выходные характеристики* инвертора напряжения, расположенных на том же периоде.**
- **форма опорного сигнала определяет *линейность регулировочной характеристики АИН*.**

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

# ШИМ

Опорный сигнал

Модулирующий сигнал

Векторные способы

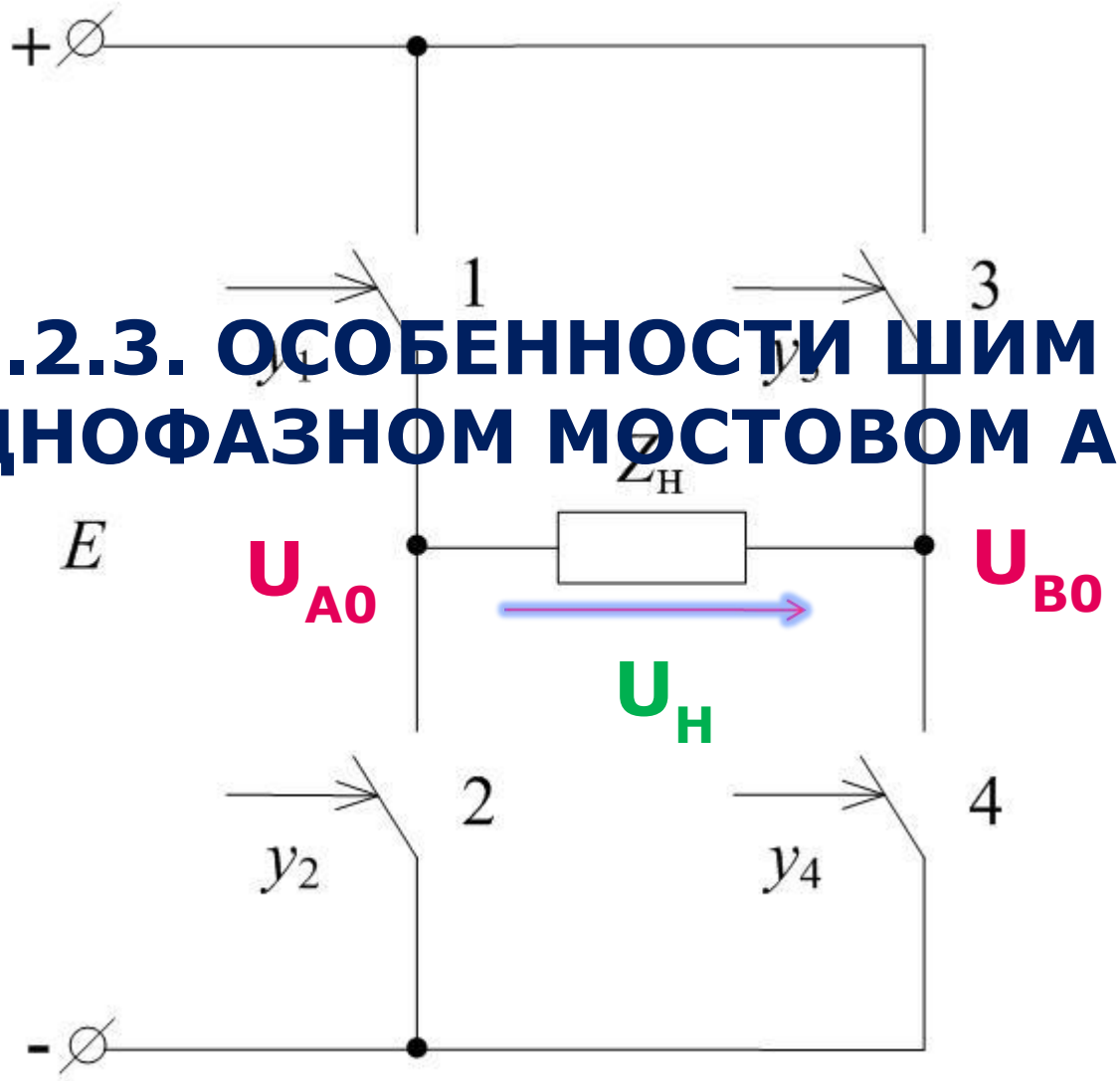
| Форма модулирующего сигнала (тип ШИМ) | Внешний вид модулирующего сигнала | Качество выходного напряжения | Линейный диапазон регулировочной характеристики |
|---|---|---|---|
| Прямоугольная (-/-ШИМ, ШИР) | | Неудовлетвори-тельное | Максимальный |
| Треугольная (-/-ШИМ) | | Неудовлетвори-тельное | Традиционный |
| Трапецеидальная (-/-ШИМ) | | Неудовлетвори-тельное | Расширенный |
| Синусоидальная (-/-ШИМ) | | Хорошее | Традиционный |
| Синусоидальная 3-й гармоникой (-/-ШИМ) | | Хорошее | Расширенный |
| Синусоидальная с меандром ( Циклическая ШИМ) | | Удовлетвори-тельное | 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

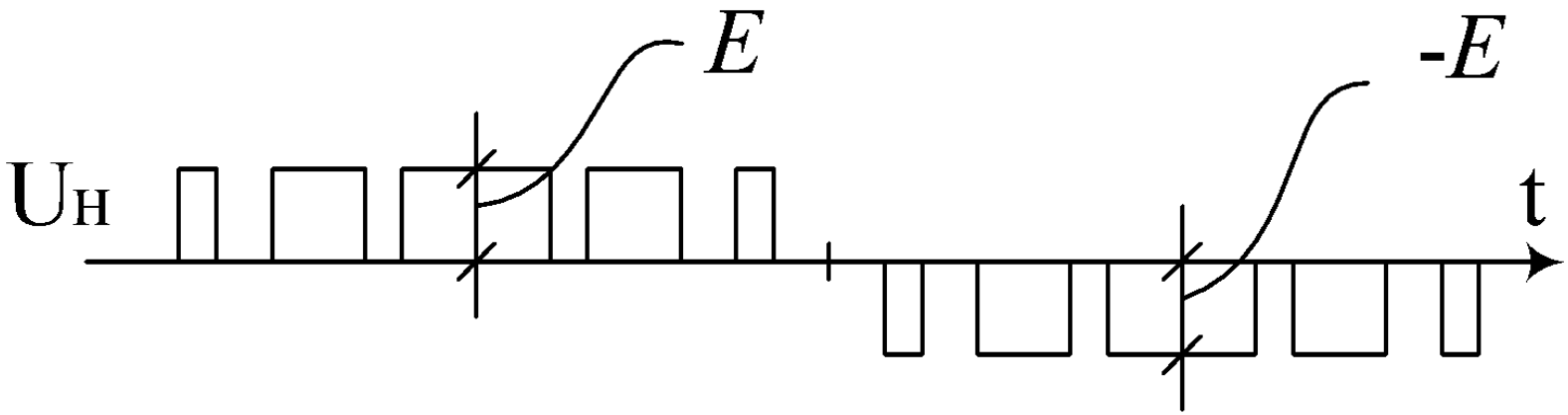
Новосибирский Государственный Технический Университет
Факультет Радиотехники, Электроники и Физики

И. А. Баховцев

# 1.2.3. ОСОБЕННОСТИ ШИМ В ОДНОФАЗНОМ МОСТОВОМ АИН



# Однополярная синусоидальная ШИМ

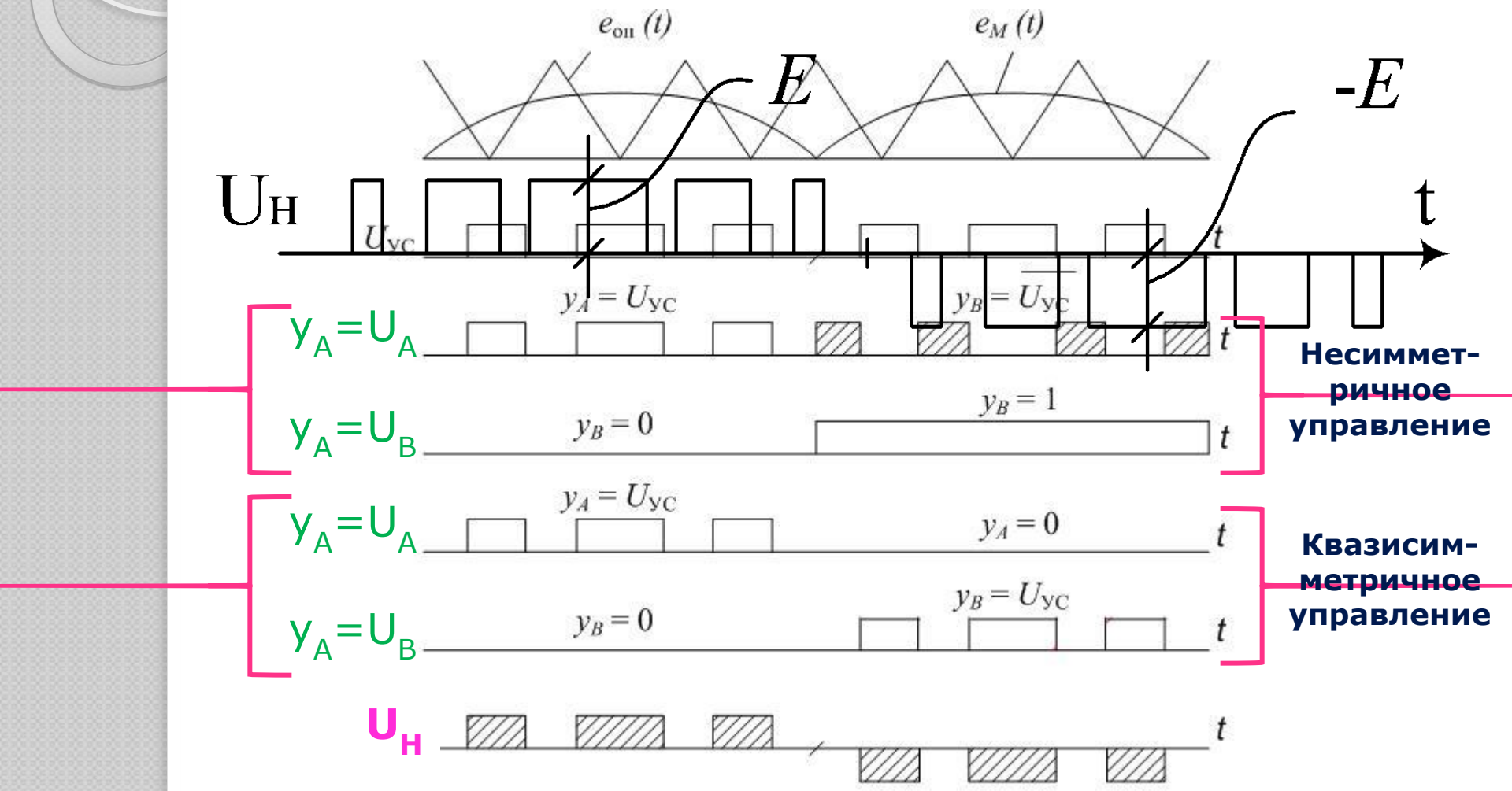



- Данное выходное напряжение можно реализовать тремя алгоритмами управления:
- **Симметричным**
- **Несимметричным**
- **Квазисимметричным**

# Алгоритмы реализации выходного напряжения однофазного АИН

| Тип алго-ритма | Плечо А | | Плечо В | | Устройство сравнения | Форма сигнала |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Симмет-ричный 1 | $e_{\text{м}}(t),\ e_{\text{оп}}(t)$ | | $-e_{\text{м}}(t),\ e_{\text{оп}}(t)$ | | Двух-канальное | $e_{\text{м}}(t),\ e_{\text{оп}}(t)$ биполярные |
| Симмет-ричный 2 | $e_{\text{м}}(t),\ e_{\text{оп}}(t)$ | | $e_{\text{м}}(t),\ -e_{\text{оп}}(t)$ | | Двух-канальное | $e_{\text{м}}(t),\ e_{\text{оп}}(t)$ биполярные |
| Несим-метрич-ный | $e_{\text{м}}(t),\ e_{\text{оп}}(t)$ | | Нет модуляции | | Одно-канальное | $e_{\text{м}}(t),\ e_{\text{оп}}(t)$ одно-полярные |
| | 0…T/2 | T/2…T | 0…T/2 | T/2…T | | |
| | $y_A = U_{\text{ус}}$ | $y_A = \overline{U_{\text{ус}}}$ | $y_B = 0$ | $y_B = 1$ | | |
| Квази-симмет-ричный | $e_{\text{м}}(t),\ e_{\text{оп}}(t)$ | | $e_{\text{м}}(t),\ e_{\text{оп}}(t)$ | | Одно-канальное | $e_{\text{м}}(t),\ e_{\text{оп}}(t)$ одно-полярные |
| | 0…T/2 | T/2…T | 0…T/2 | T/2…T | | |
| | $y_A = U_{\text{ус}}$ | $y_A = 0$ | $y_B = 0$ | $y_B = U_{\text{ус}}$ | | |

# 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

И. А. Баховцев

# 1.3. ПАРАМЕТРЫ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

1. **Глубина модуляции**

- это отношение амплитуды модулирующего сигнала к амплитуде опорного сигнала.

Она определяет прежде всего величину **первой гармоники** выходного напряжения.

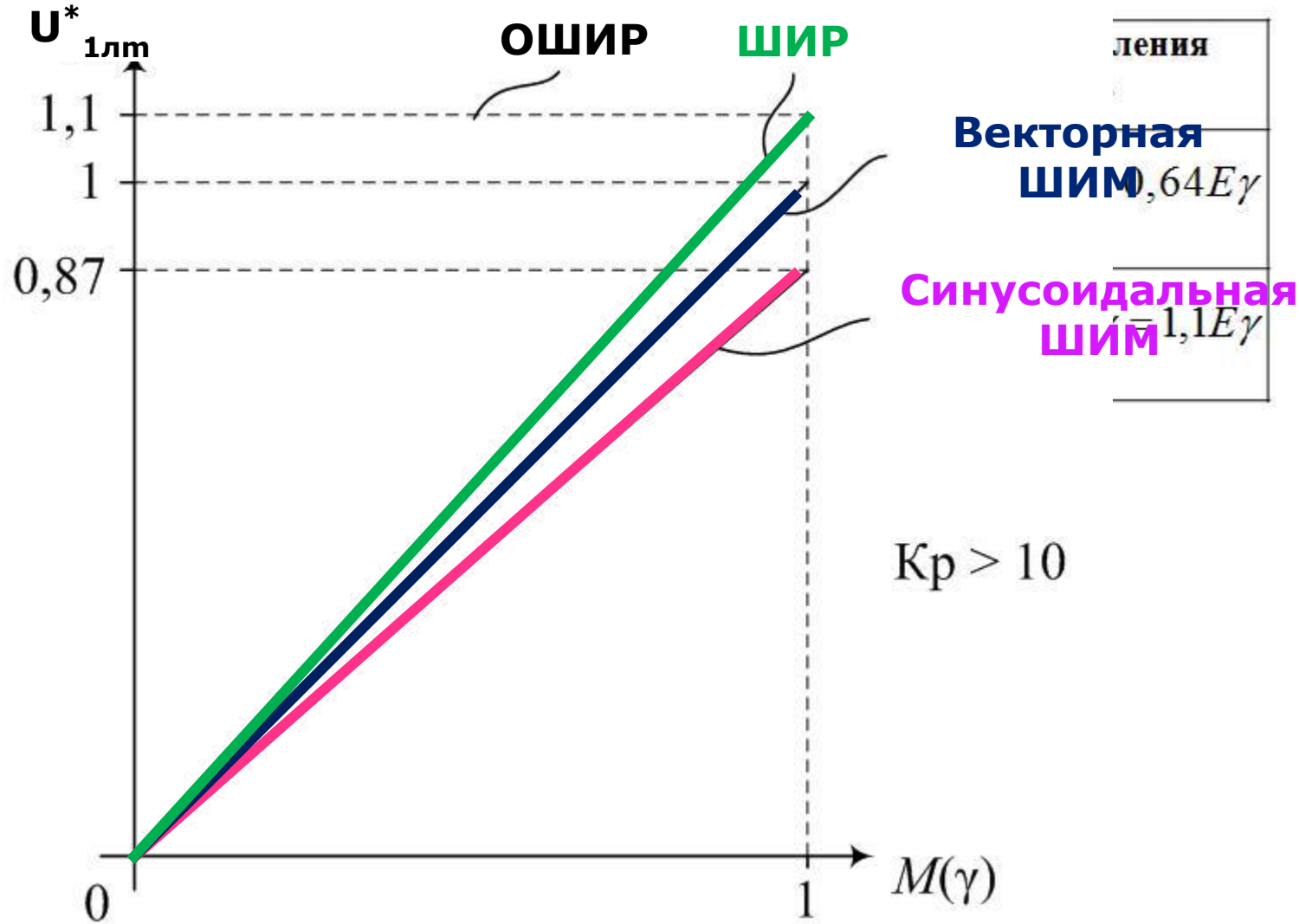
$$M = E_{\text{м}} / E_{\text{оп}}$$

**Зависимость амплитуды первой гармоники выходного напряжения от глубины модуляции называется регулировочной характеристикой АИН.**

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

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

# Регулировочные характеристики АИН

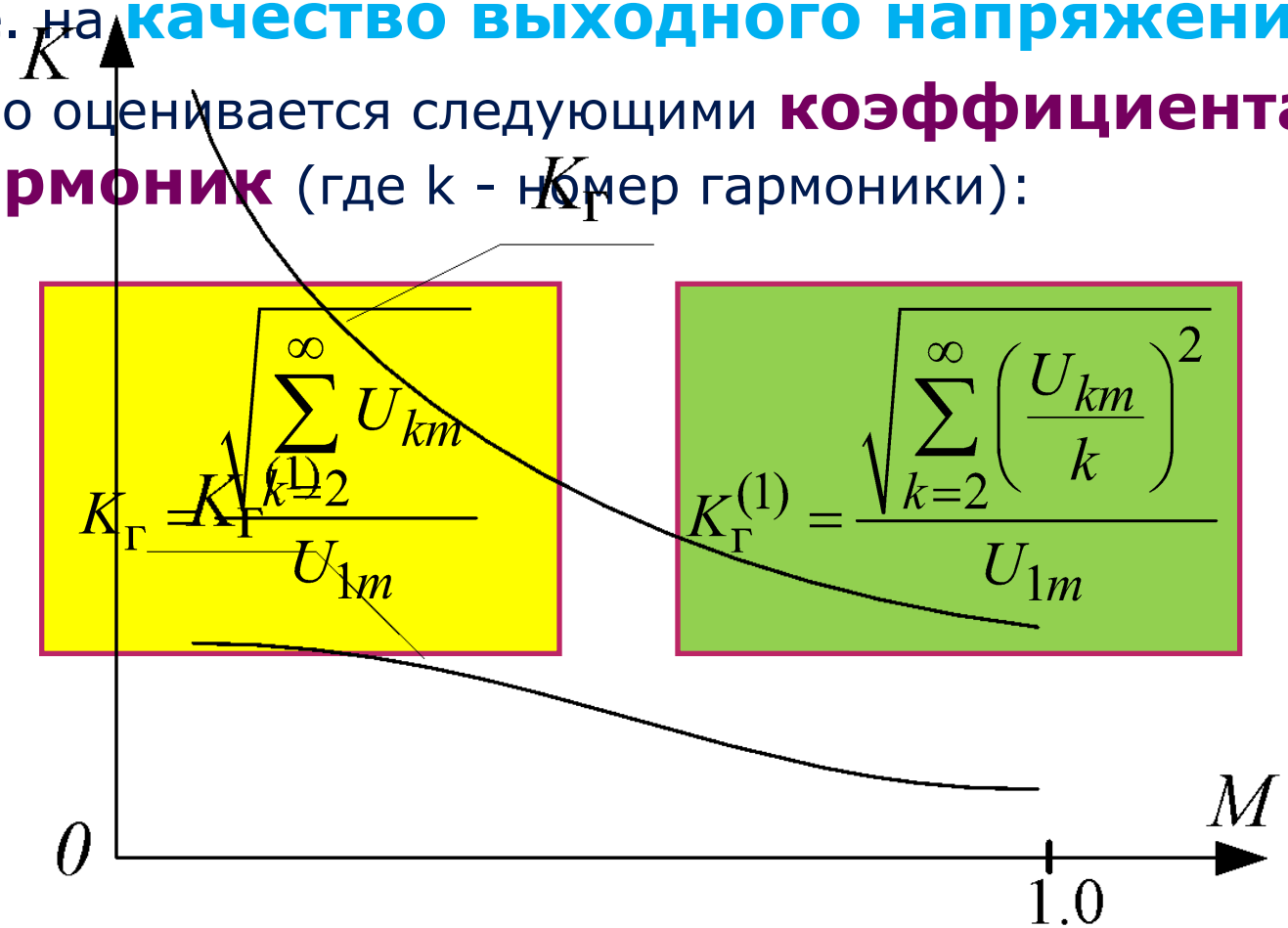



$U^*_{1лm}$ – выражена в относительном выражении к Е

- 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):

$$K_{\text{г}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_{km}^{(1)}}}{U_{1m}}$$

$$K_{\text{г}}^{(1)} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{U_{km}}{k}\right)^2}}{U_{1m}}$$

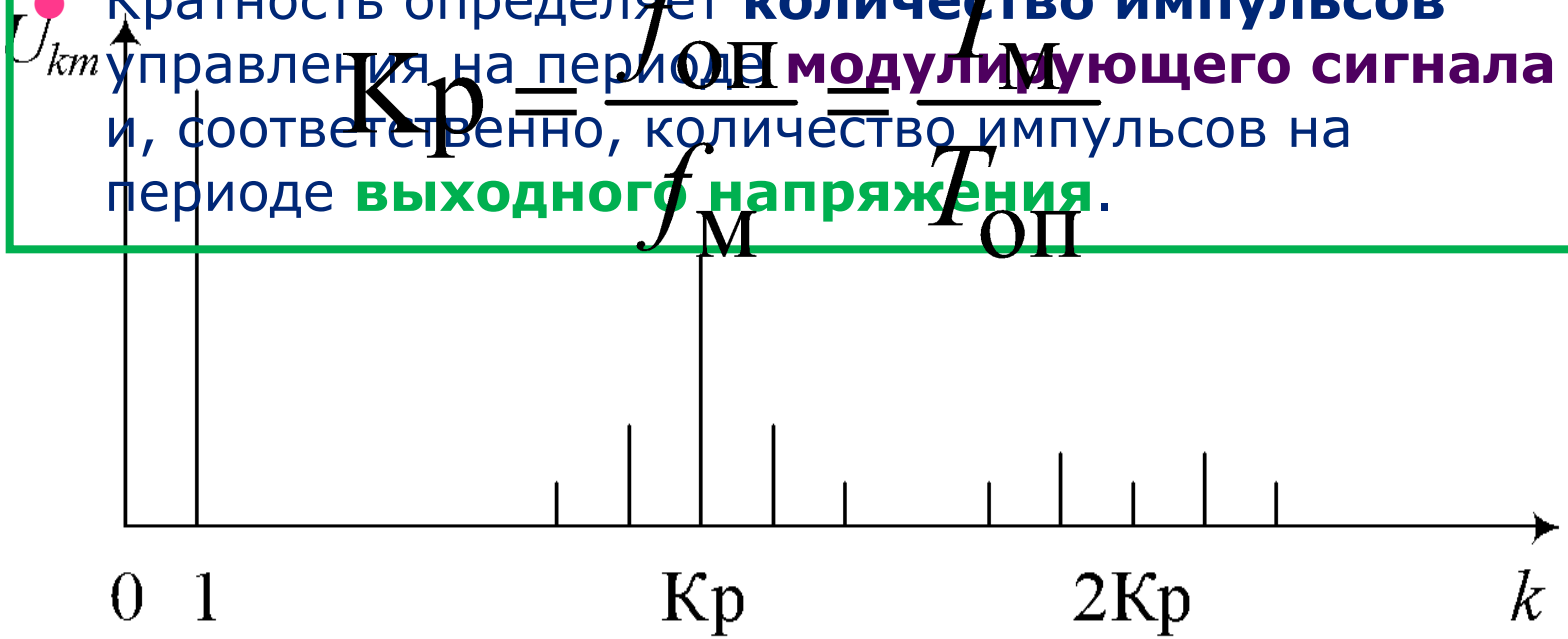


# ПАРАМЕТРЫ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

2. **Кратность частот опорного и модулирующего сигналов**

- Кратность определяет **количество импульсов** управления на периоде **модулирующего сигнала** и, соответственно, количество импульсов на периоде **выходного напряжения**.

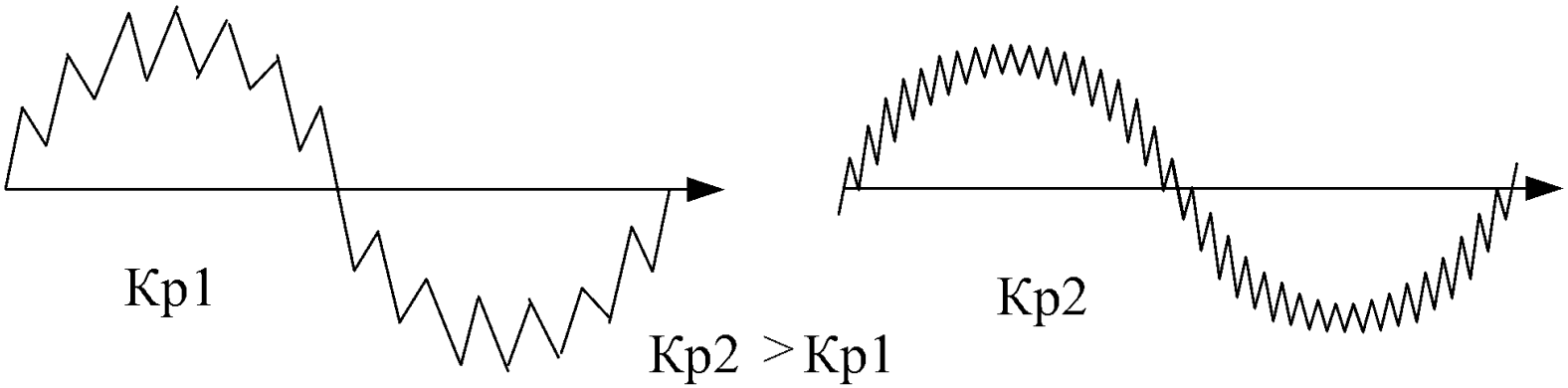
$$\text{Кр} = \frac{f_{\text{оп}}}{f_{\text{м}}} = \frac{T_{\text{м}}}{T_{\text{оп}}}$$




**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 Кр:

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

| Тип ключей | $f_{max}$, (кГц) |
|---|---|
| *MOSFET* | 20…50 |
| *IGBT* | 1…20 |
| *GTO* | 0,5…1 |

- «**Снизу**» - при **Кр < 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.

Новосибирский Государственный Технический Университет
Факультет Радиотехники, Электроники и Физики

И. А. Баховцев

# 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.

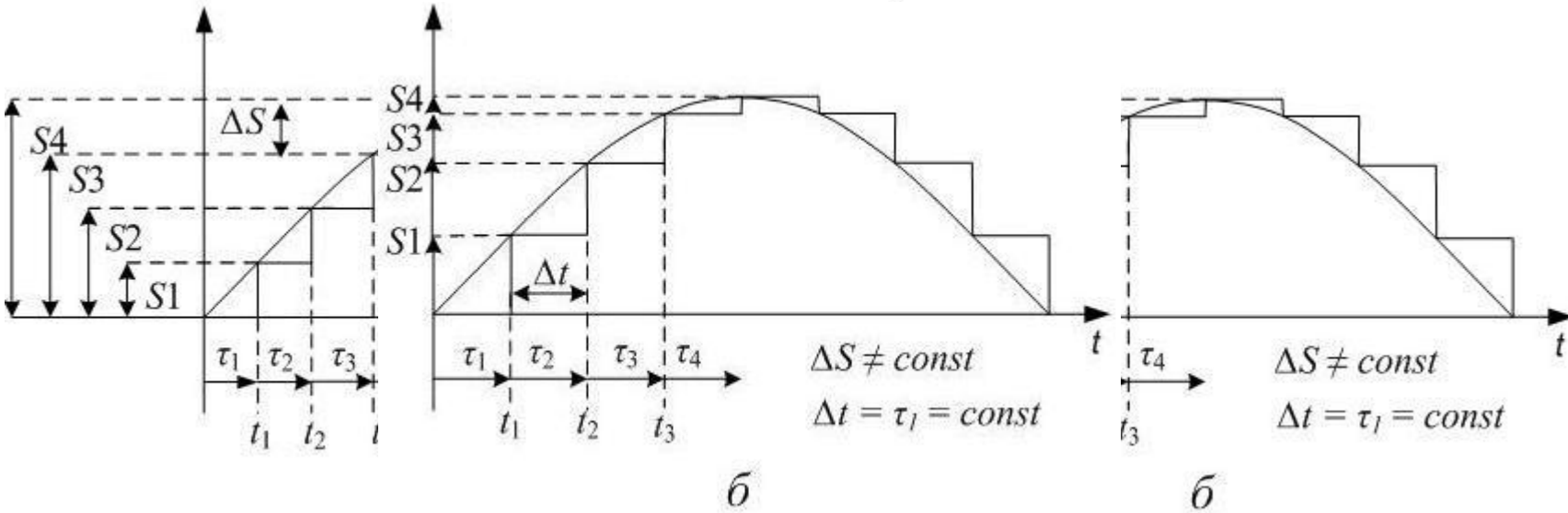
**Однако,**

**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

**ΔS=const**

**Δt=const**



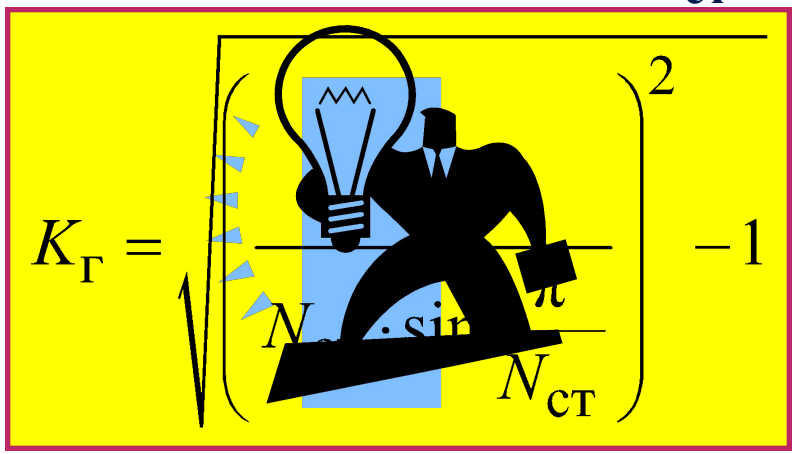

- В силовых устройствах

- В системах управления

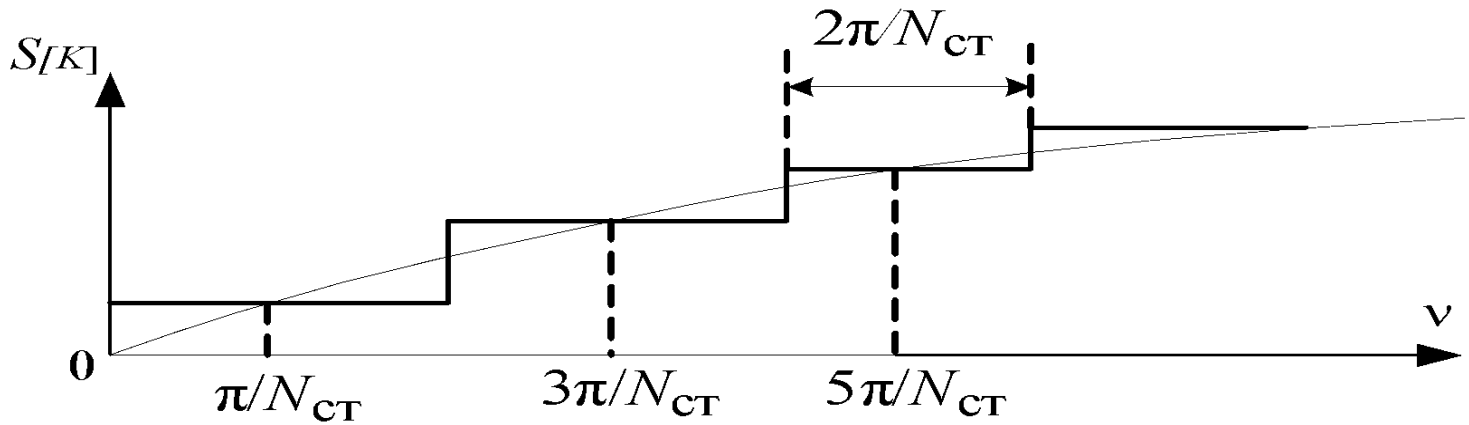
# Проблемы:

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 ($N_{ст}$) **нереализуемо.**

## Как выбрать $N_{ст}$?



# Решение 1-ой проблемы:




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

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

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

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

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

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

# Продолжение следует!