

# Лекция №16 по дисциплине «Электрический привод»

---

**ТЕМА: «СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ»**

# Скалярное управление (частотное управление)

---

Под скалярным управлением понимают все не векторные системы управления электроприводом. Данные системы включают в себя простые системы управления асинхронным двигателем при питании его от источника напряжения регулируемой частоты. Существуют три основных закона скалярного управления:

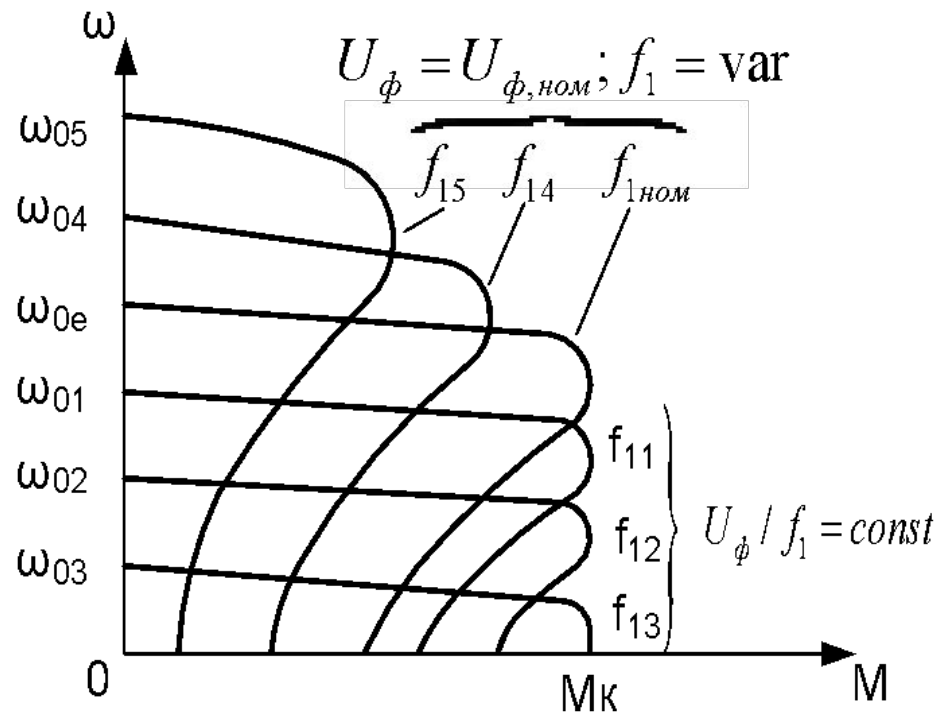
$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const} \quad \frac{U_1}{f_1^2} = \text{const} \quad \frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const}$$

Первый используется для постоянного момента нагрузки, второй для вентиляторной нагрузки, третий при моменте нагрузки обратно пропорциональном скорости.

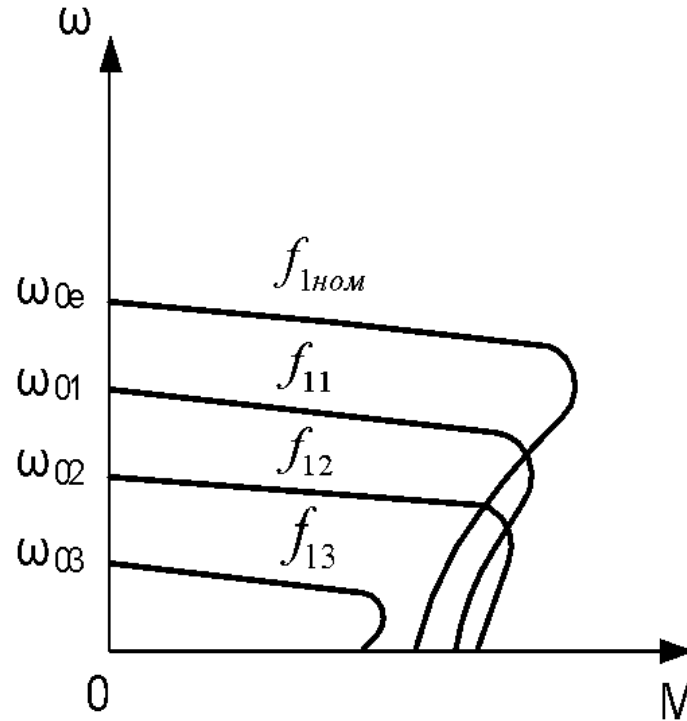
Наиболее широко распространен первый закон управления, так как в нем поддерживаются постоянными жесткость, критический момент и относительное критическое скольжение (не абсолютное !!!).

# Скалярное управление (частотное управление)

$$f_{15} > f_{14} > f_{1ном} > f_{11} > f_{12} > f_{13}$$



а)



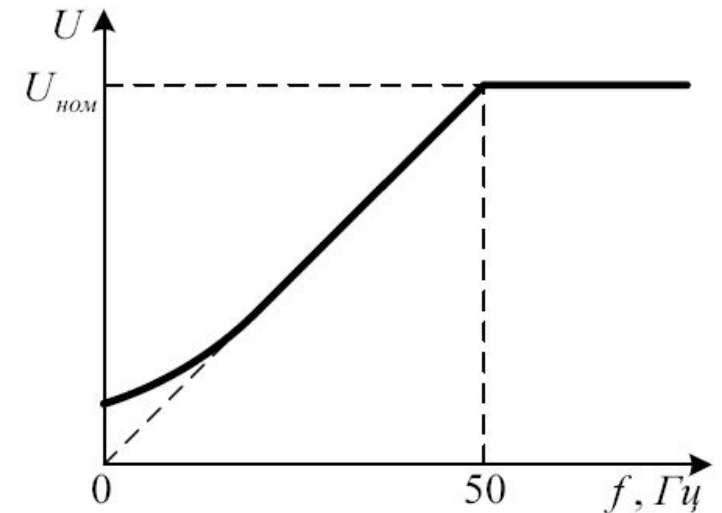
б)

Механические  
характеристики при  
частотном  
регулировании  
координат АД:  
а – расчетные;  
б – практические

# IR - компенсация

Из графиков видно, что при небольших частотах произошло снижение критического момента АД. Причина этого заключается в уменьшении магнитного потока АД при низких частотах вследствие влияния активного сопротивления статора, вызывающего из-за падения напряжения на активном сопротивлении статора уменьшение ЭДС АД. Для компенсации этого влияния следует с уменьшением частоты снижать напряжение в меньшей степени, чем это предусмотрено соотношением.

Такое падение напряжения не только снижает критический момент и повышает критическое скольжение, но также приводит к нагреву обмотки статора двигателя.



# Векторное управление

---

Векторное управление — метод управления СД и АД, не только формирующим гармонические токи (напряжения) фаз, но и обеспечивающим управление магнитным потоком ротора (моментом на валу двигателя). Векторное управление применяется в случае, когда в процессе эксплуатации нагрузка может меняться на одной и той же частоте, т.е. нет четкой зависимости между моментом нагрузки и скоростью вращения, а также в случаях, когда необходимо получить расширенный диапазон регулирования частоты при номинальных моментах, например, 0...50 Гц для момента 100% или даже кратковременно 150-200% от  $M_{ном}$ , это позволяет существенно увеличить диапазон управления, точность регулирования, повысить быстродействие электропривода. Этот метод обеспечивает непосредственное управление вращающим моментом двигателя..

- Такое управление заключается в математическом разделении двух каналов, отвечающих за регулирование в первой и второй зонах. Фактически АД, представляется в виде ДПТ НВ, имеющей две независимые обмотки.
- Векторное управление имеет 2 разновидности: DTC и FOC.

| Способ управления                                                       | Диапазон регулирования скорости | Точность регулирования скорости |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| <b>Скалярное управление:</b>                                            |                                 |                                 |
| – разомкнутая система                                                   | до 10                           | до 10%                          |
| – замкнутая система с обратной связью по току статора и IR–компенсацией | 10                              | до 5%                           |
| – замкнутая система с обратной связью по скорости                       | менее 120                       | 0,02%                           |
| <b>Векторное управление (FOC):</b>                                      |                                 |                                 |
| – без датчика скорости (с внутренней моделью)                           | 100–120                         | 0,5 – 0.2%                      |
| – с датчиком скорости                                                   | 1000                            | 0,01 – 0,02%                    |
| <b>Прямое управление моментом (DTC):</b>                                |                                 |                                 |
| – без датчика скорости (с внутренней моделью)                           | 1000                            | до 10%                          |
| – с датчиком скорости                                                   | 5000                            | 0,01%                           |

|             | Скалярное управление<br>( $U/f=\text{const}$ )         | Векторное управление<br>(FOC)                            | Прямое управление<br>моментом (DTC)                                                                                                                |
|-------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Достоинства | Простота реализации                                    | Высокая точность регулирования $\omega$                  | Достоинства те же, что и у FOC, но: проще координатные преобразования и более быстрая реакция электромагнитного момента на управляющее воздействие |
|             |                                                        | Быстрая реакция на изменение нагрузки                    |                                                                                                                                                    |
|             |                                                        | Высокий диапазон регулирования и точность                |                                                                                                                                                    |
|             |                                                        | Повышение КПД двигателя                                  |                                                                                                                                                    |
| Недостатки  | Невозможность одновременного управления $M$ и $\omega$ | Необходимость задания <b>точных</b> параметров двигателя | Большие флуктуации $M$ двигателя                                                                                                                   |
|             | Сложность управления по $M$                            | Большие колебания $\omega$ при постоянной нагрузке       | Непостоянство частоты коммутаций ключей инвертора                                                                                                  |
|             | Низкий диапазон регулирования                          | Большая вычислительная сложность                         | Большая амплитуда $I_s$ при пуске                                                                                                                  |

# Преобразователи частоты. Общие сведения.

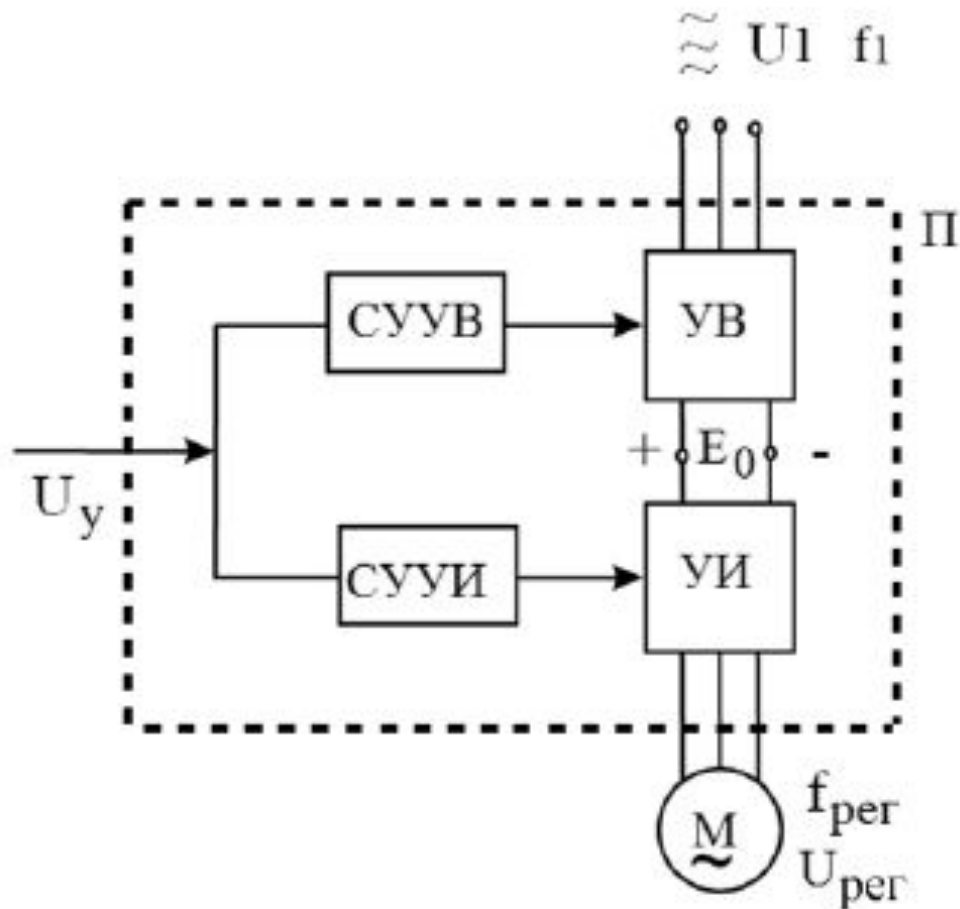
---

Имея на входе переменное напряжение неизменных амплитуды и частоты, электрический преобразователь может преобразовать его как в переменное напряжение той же частоты, но другой амплитуды, так и в переменное напряжение с другими амплитудой и частотой. В первом случае электрический преобразователь называют преобразователем напряжения (ПН), во втором – **преобразователем частоты (ПЧ)**.

Электрический преобразователь может выполнять функцию выпрямителя, т. е. преобразовывать переменное напряжение в постоянное, либо инвертора – преобразовывать постоянное напряжение в переменное, если источник энергии находится на стороне постоянного напряжения.

Кроме того, электрический преобразователь может быть импульсным, т. е. преобразовывать стандартное переменное напряжение сети в последовательность импульсов, амплитуда, длительность, скважность, форма и другие признаки которых определяются специфическими особенностями работы электромеханического преобразователя.

# ПЧ со звеном постоянного тока.



Выпрямленное напряжение  $E_0$  подается на силовой фильтр, находящийся в звене постоянного тока, который обеспечивает 2 функции: сглаживание выходного напряжения выпрямителя и циркуляцию реактивной мощности в ПЧ. После фильтра напряжение подается на вход инвертора, который преобразует напряжение постоянного тока  $E_0$  в трехфазное амплитуды  $U_{рег}$  и регулируемой частоты  $f_{рег}$ . Реализация  $УВ$  и  $УИ$  может быть самой разнообразной. На практике нашли распространение 2 схемы:

1. автономный инвертор тока (АИТ)
2. автономный инвертор напряжения (АИН)

На рис.  $УВ$  – управляемый выпрямитель,  $УИ$  – управляемый инвертор

# ПЧ со звеном постоянного тока.

---

*Инвертором* называется преобразователь напряжения постоянного тока в напряжение переменного тока. Эти преобразователи используются в составе преобразователей частоты в случае питания ЭП от сети переменного тока или в виде самостоятельного преобразователя при питании ЭП от источника постоянного напряжения. В составе ЭП они обеспечивают, как правило, получение переменного напряжения регулируемой частоты, что требуется для регулирования скорости двигателей переменного тока. Существует большое количество инверторов, различающихся своими схемами, характеристиками и областями применения. *В схемах ЭП наибольшее применение нашли автономные инверторы напряжения.*

*Автономные инверторы напряжения (АИН)* имеют жесткую внешнюю характеристику, представляющую собой зависимость выходного напряжения от тока нагрузки, вследствие чего при изменении тока нагрузки их выходное напряжение практически не изменяется. Управляющим воздействием на двигатель переменного тока является напряжение регулируемой частоты.

# Автономный инвертор напряжения:

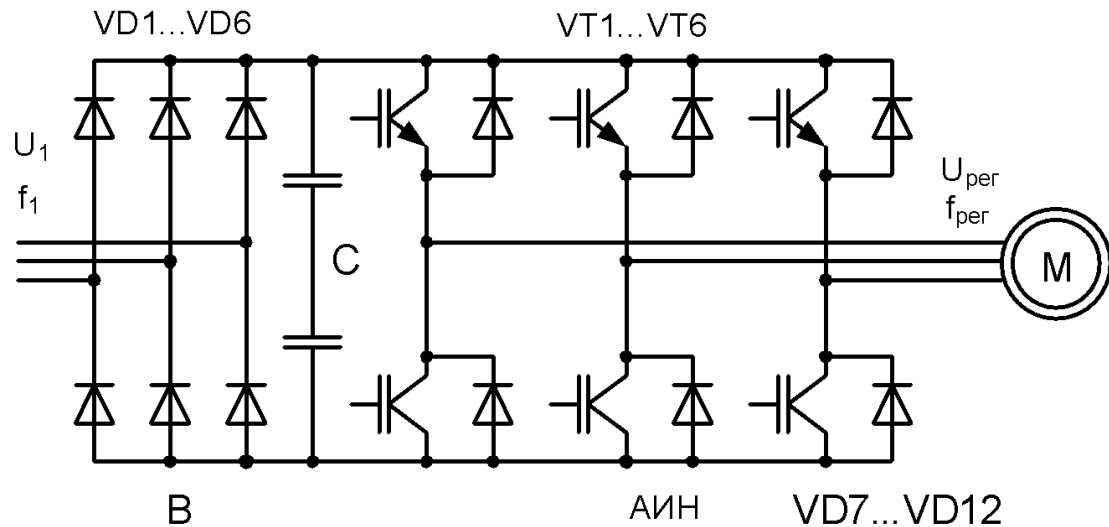
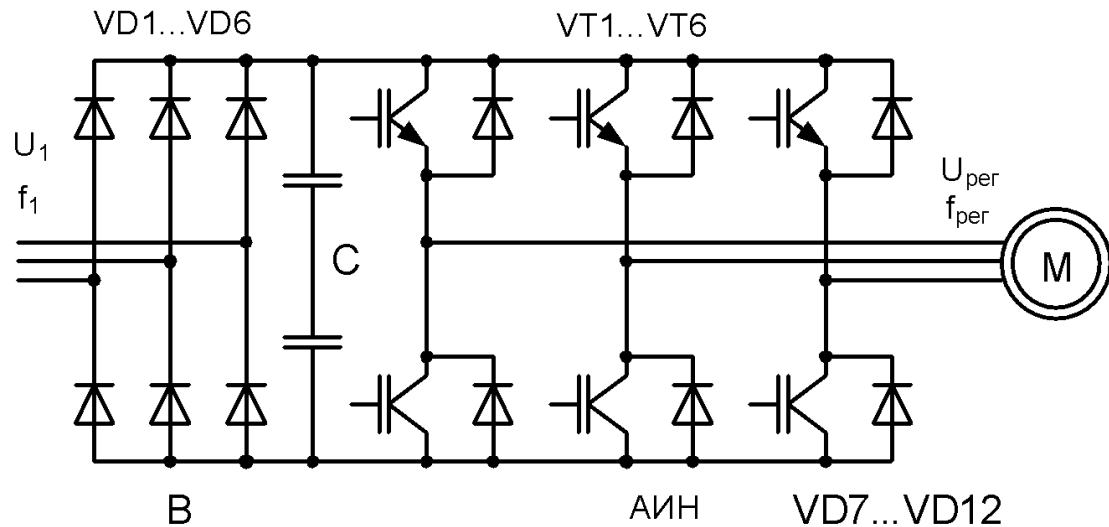


Схема АИН состоит из нерегулируемого выпрямителя  $В$ , собранного на шести диодах  $VD1 - VD6$ , и автономного инвертора напряжения АИН на шести управляемых ключах, в качестве которых на схеме показаны модули, содержащие биполярные транзисторы с изолированным затвором  $VT1 - VT6$  и шунтирующие диоды  $VD7 - VD12$ . Регулирование напряжения на нагрузке осуществляется широтно-импульсной модуляцией выпрямленного напряжения. Конденсаторы  $C$  выполняют роль фильтра и элемента, осуществляющего обмен реактивной мощности с нагрузкой

# Достоинства и недостатки АИН:



Достоинства: большое регулирование частоты (от долей Гц до кГц), возможность параллельной работы нескольких двигателей от одного ПЧ, высокий коэффициент мощности (0,95-0,98).

Недостатки: невозможность рекуперации энергии в сеть, если используются неуправляемые выпрямители; более низкий КПД по сравнению с ПЧ с непосредственной связью.

На сегодняшний день АИН – самый распространенный тип двухзвенного ПЧ.

# Выбор ПЧ:

---

Выбираемый преобразователь частоты должен соответствовать следующим требованиям:

□ Параметры питающей сети: 3-х фазная сеть 400 В, 50 Гц.

□ Если двигатель работает при нагрузке, которая не выше номинального момента двигателя, то номинальный ток инвертора должен удовлетворять условию:

$$I_{\text{ином}} \geq I_{\text{дв ном}}$$

□ Если к ПЧ будет подключаться несколько двигателей, то тогда:  $I_{\text{ином}} \geq 1,25 \sum I_{\text{дв ном}}$

□ При условии, что к приводу не предъявляются повышенные требования по динамике и перегрузочной способности (при спокойной нагрузке), возможно применение преобразователя, который имеет мощность, удовлетворяющую условию:  $P_{\text{ином}} \geq P_{\text{дв ном}}$

□ Если к ПЧ будет подключаться несколько двигателей  $P_{\text{ином}} \geq \sum P_{\text{дв ном}}$

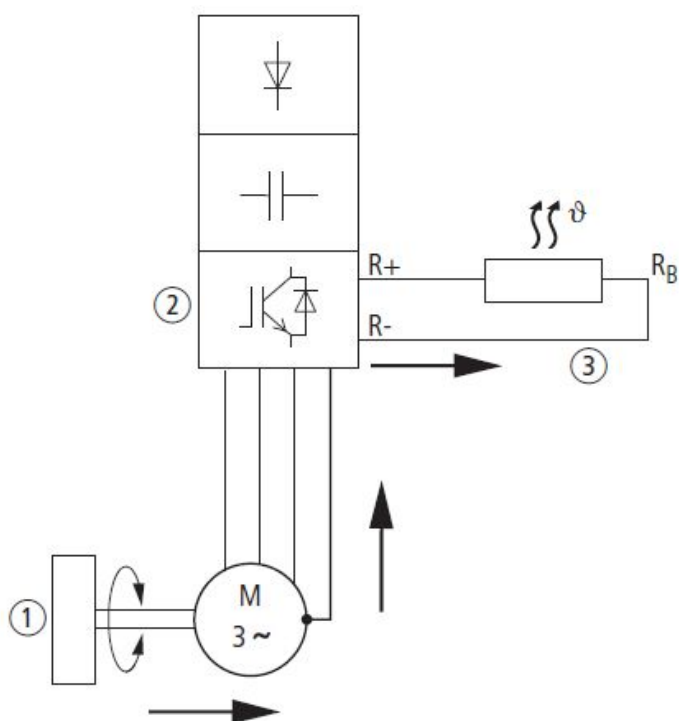
# Выбор ПЧ:

---

Выбираемый преобразователь частоты должен соответствовать следующим требованиям:

- Поддержка требуемого метода частотного управления. Различают три основных способа управления в системе ПЧ–АД: скалярный, векторный, прямое управление моментом. Каждый способ управления имеет свои достоинства и недостатки, которые обуславливают необходимость его применения на конкретном оборудовании.
- Совместимость с двигателем и контроллером (если есть возможность, то двигатель, ПЧ и контроллер должны быть произведены одной фирмой).
- Возможность рекуперации энергии в сеть (наличие управляемых выпрямителей) – если двигатель часто работает в режиме рекуперативного торможения.

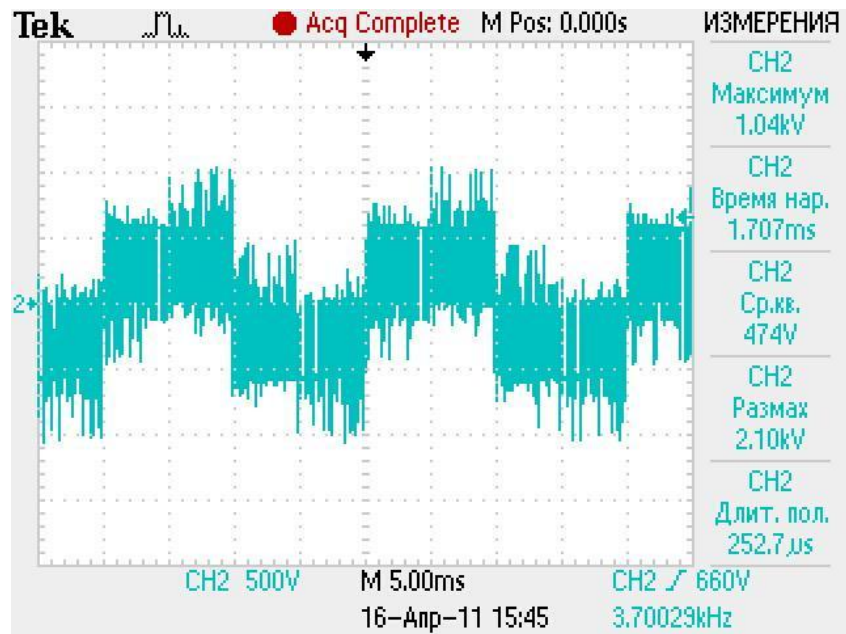
# Тормозной прерыватель:



При торможении электропривода, двигатель может переходить в генераторный режим. Генерируемая при этом энергия возвращается в частотный преобразователь и выпрямляется на обратных диодах IGBT-транзисторов, следовательно растет напряжение на звене постоянного тока (ЗПТ). Часть этого напряжения (20-30%) может быть рассеяно на силовых элементах, на разрядных резисторах ЗПТ и др. Однако, если этого не достаточно, то напряжение может вырасти до опасного значения.

Чтобы разрядить перенапряжение требуется внешний тормозной резистор, и силовой ключ который открывал бы цепь при повышенных значениях и закрывал при нормальных - чтобы энергия сети не рассеивалась на резисторах. Таким ключом является тормозной прерыватель.

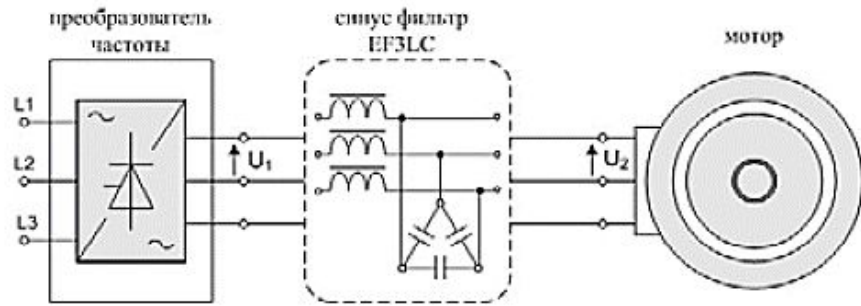
# Перенапряжения на выходе ПЧ при подключении через кабель:



В большинстве случаев напряжение на выходе ПЧ формируется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Высокое значение скорости нарастания напряжения на фронте импульсов ( $du/dt$ ) вызывает протекание в кабельной линии (КЛ) и обмотке двигателя специфических волновых процессов, что приводит к возникновению следующих нежелательных явлений:

- перенапряжений на обмотках двигателя которые сокращают срок службы его изоляции;
- электромагнитного излучения высокой частоты, оказывающего негативное воздействие на работу слаботочных устройств автоматики (контроллеры, датчики и т. п.), находящихся рядом с ПЧ;
- дополнительных тепловых потерь в стали двигателя.

# Выходные фильтры (синус-фильтры, дроссели, ферритовые кольца):



При длинах кабельной линии, соединяющей ПЧ и АД более чем 75-100 м, необходимо использовать специальные фильтры электромагнитной совместимости (ЭМС), которые будут снижать возникающие перенапряжения

К таким фильтрам относятся дроссели (снижают крутизну нарастания импульса напряжения, используются при относительно низких длинах кабеля) и синус-фильтры (корректируют выходное напряжение до практически синусоидальной формы, убирают перенапряжения, однако более дорогие. Используются при больших длинах кабеля. Нельзя использовать при использовании прямого управления моментом).

Номинальный ток дросселя (синус-фильтра) не должен быть меньше номинального тока асинхронного двигателя.

# Контрольные вопросы:

---

1. Какие виды скалярного управления существуют?
2. Назовите достоинства управления  $U/f=\text{const}$ .
3. Что такое IR-компенсация? Для чего она нужна?
4. Когда применяется векторное управление?
5. Назовите виды векторного управления?
5. Что такое ПЧ?
6. Какие виды ПЧ со звеном постоянного тока существует?
7. Каковы функции выпрямителя, инвертора и звена постоянного тока в ПЧ?
8. Каковы достоинства и недостатки АИН?
9. По каким критериям выбирается ПЧ?
10. Для чего нужен тормозной прерыватель?
11. Какие проблемы могут возникнуть в системе ПЧ-КЛ-АД?
12. Какие фильтры ЭМС существуют?
13. По какому критерию выбирают фильтры ЭМС?