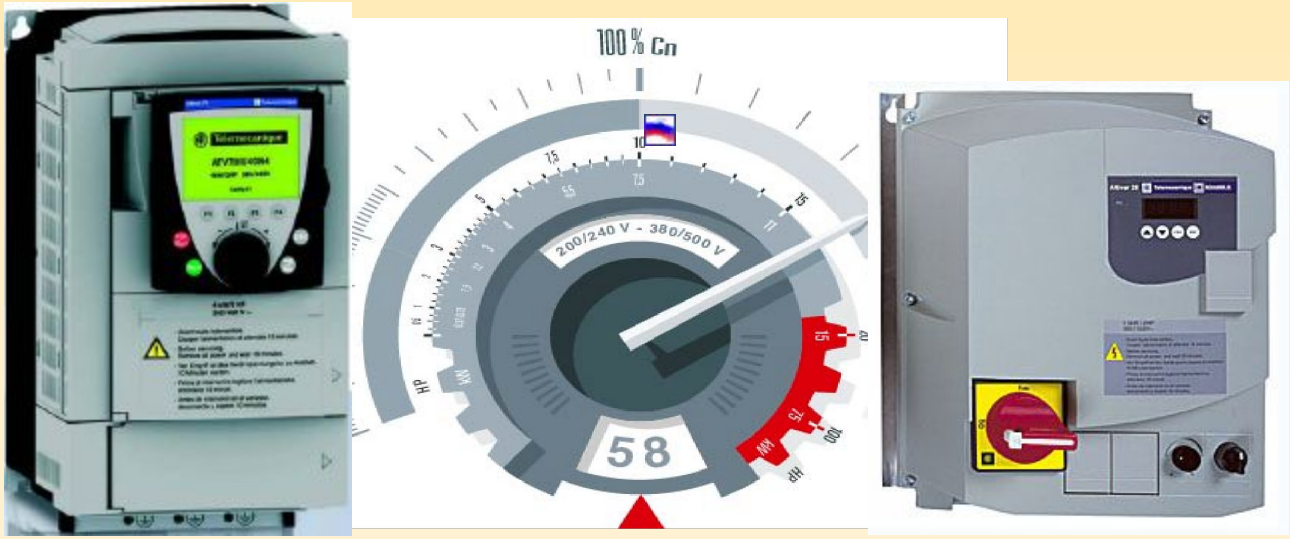
Сучасні частотно-керовані електроприводи змінного струму



Місюренко В.О.-НУ «Львівська Політехніка

e-mail: vmissur@polynet.lviv.ua

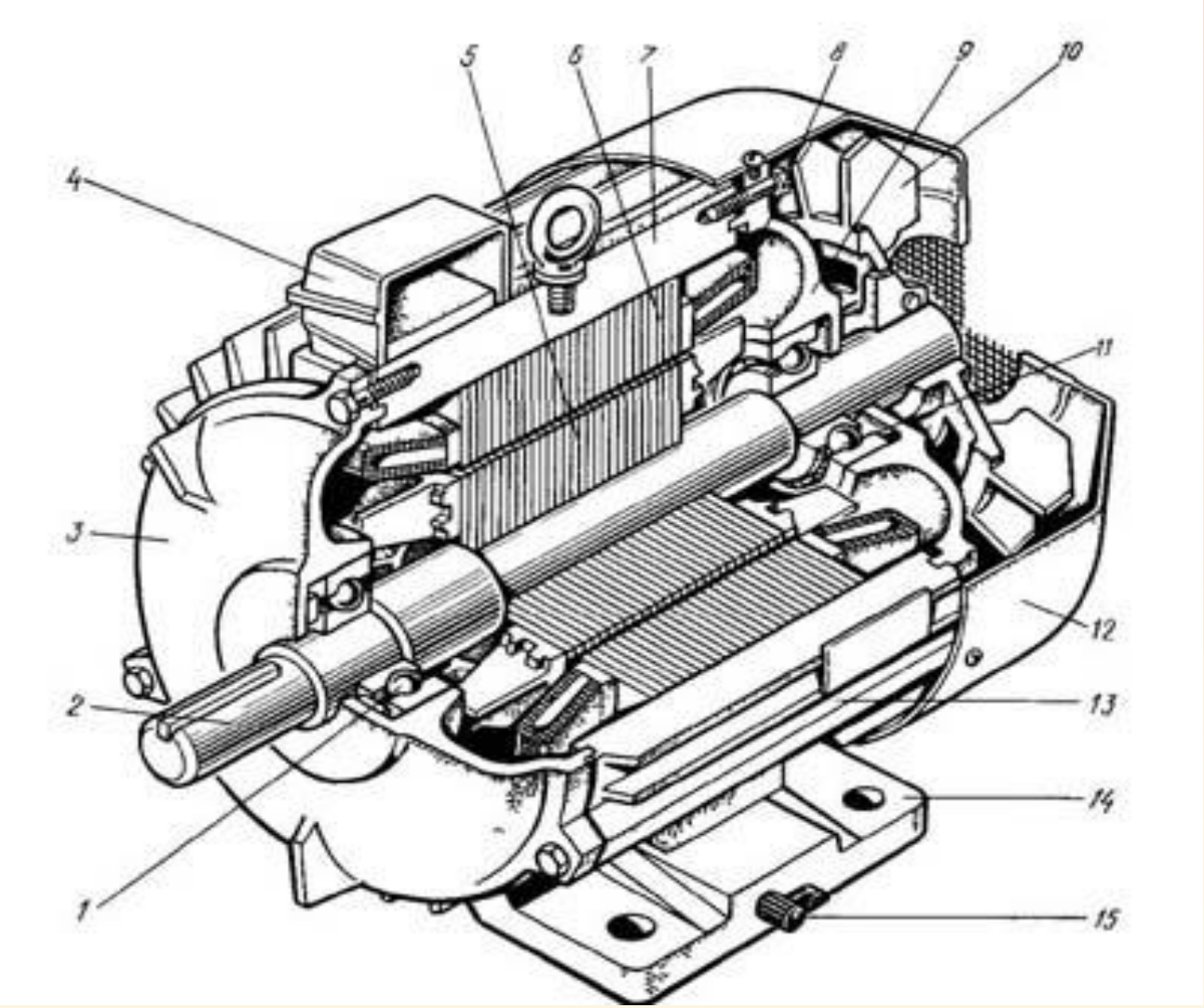
Зміст

- Основи теорії частотного керування асинхронними електроприводами
  - *Принцип роботи асинхронного двигуна, основні співвідношення*
  - *Закони частотного керування: поняття, визначення особливості та характеристики*
- **Принцип роботи перетворювачів частоти**
  - *Принцип формування вихідної напруги: амплітудна та широтно-імпульсна модуляція*
  - *Способи формування гальмівного режиму роботи двигуна*
  - *Особливості роботи вхідного випрямляча*
- Електроприводи ALTIVAR від SE
  - *Принцип роботи, основні характеристики та функціональні можливості,*
  - *Проблема EMC*
  - *Проблема захисту та координації комутаційної апаратури*

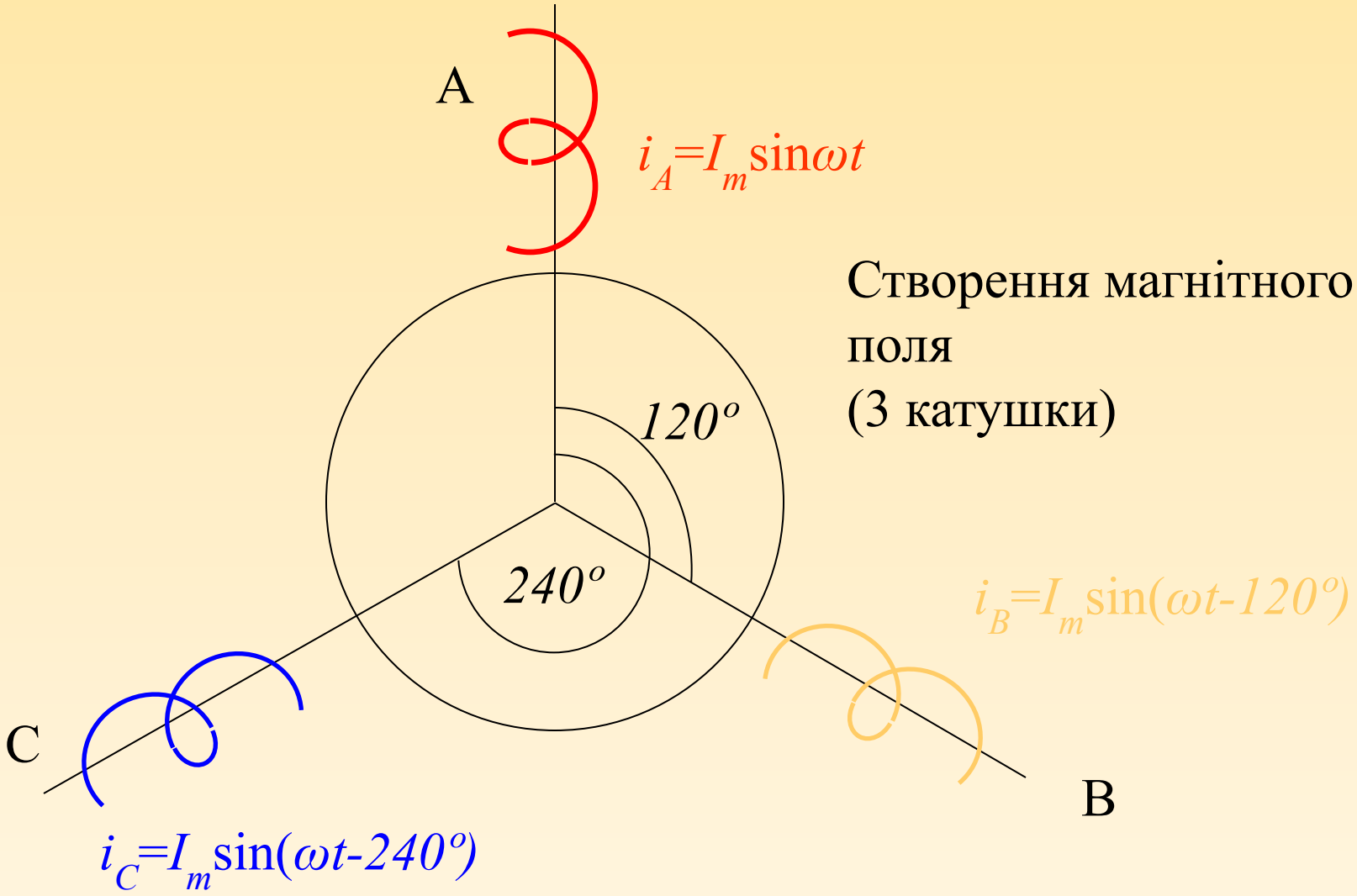
Основи теорії частотного керування асинхронними електроприводами

- *Принцип роботи асинхронного двигуна,*
- *основні співвідношення*
- *Закони частотного керування:*
  - Скалярне керування, поняття, закони U/f , IR- компенсація
  - Векторне керування, принцип, особливості
  - Закон збереження енергії
- *Приклади структурних схем САК*

КОНСТРУКЦІЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ



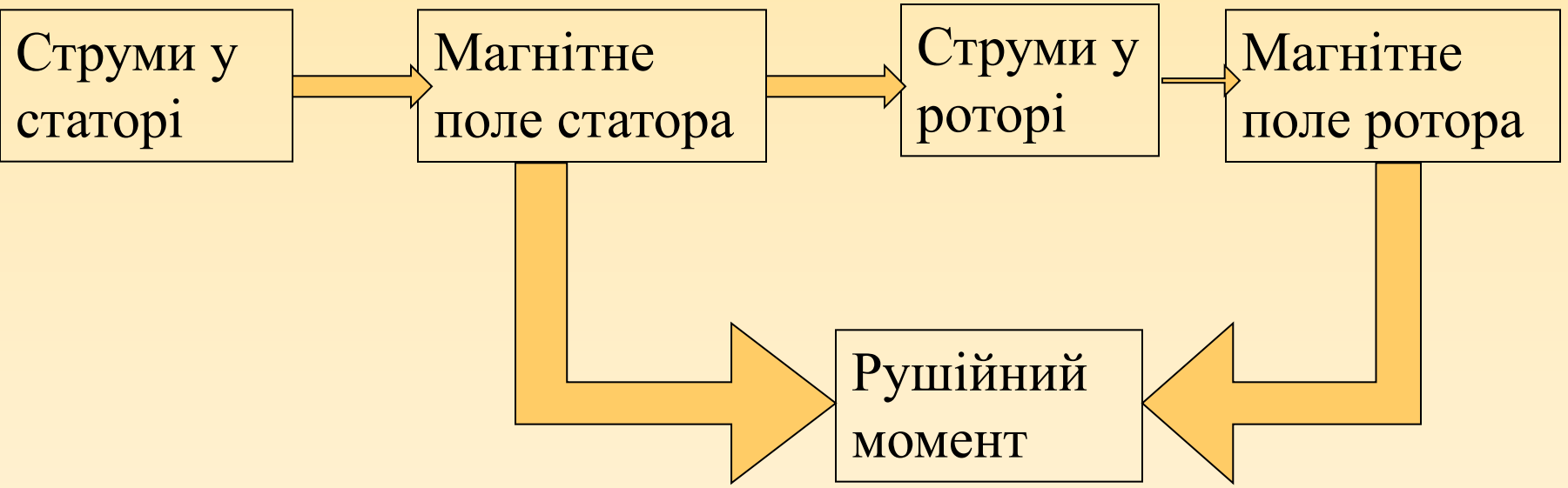
ПРИНЦИП РОБОТИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА



Створення магнітного поля
(3 катушки)

ПРИНЦИП РОБОТИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Формування момента



Момент: $M=c\Phi_2 I_1$

МЕХАНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА АД

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}};$$

$$M_k = \frac{3pU_1^2}{2\omega_1\left(r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2}\right)};$$

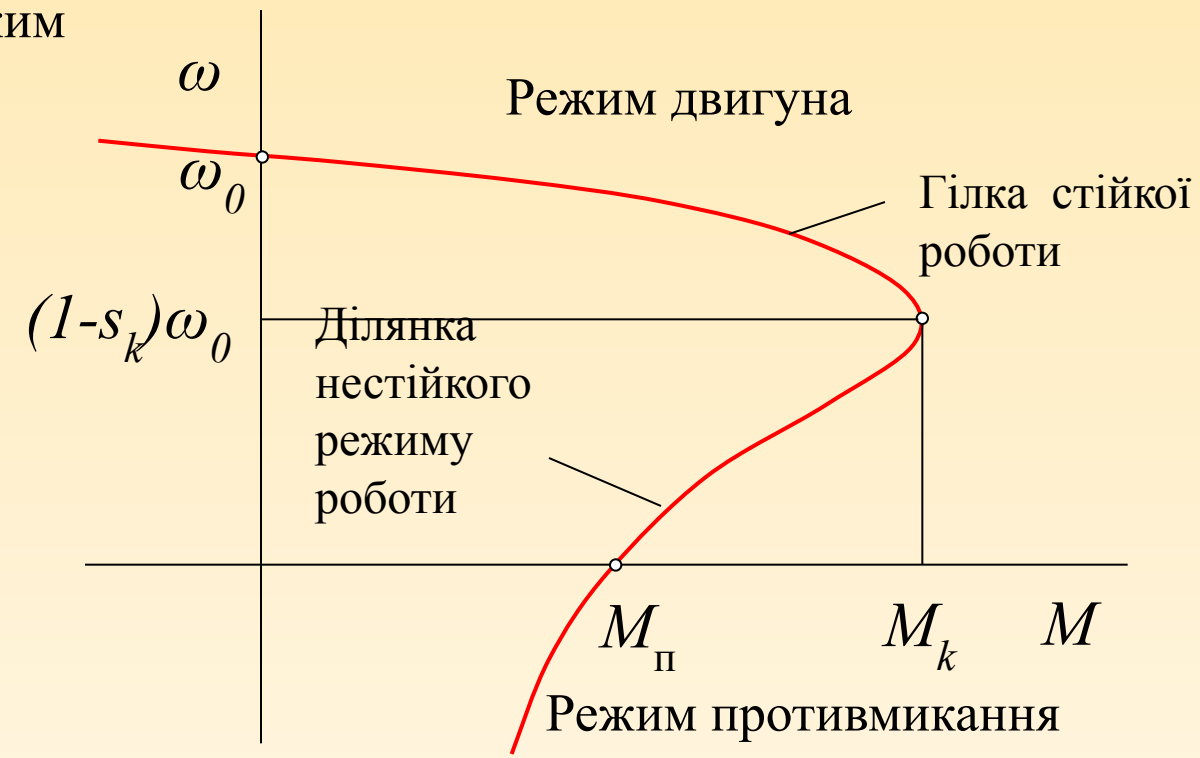
$$x_k = x_1 + x_2';$$

$$\omega_1 = 2\pi f_1;$$

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0};$$

$$\omega_0 = \omega_1 p;$$

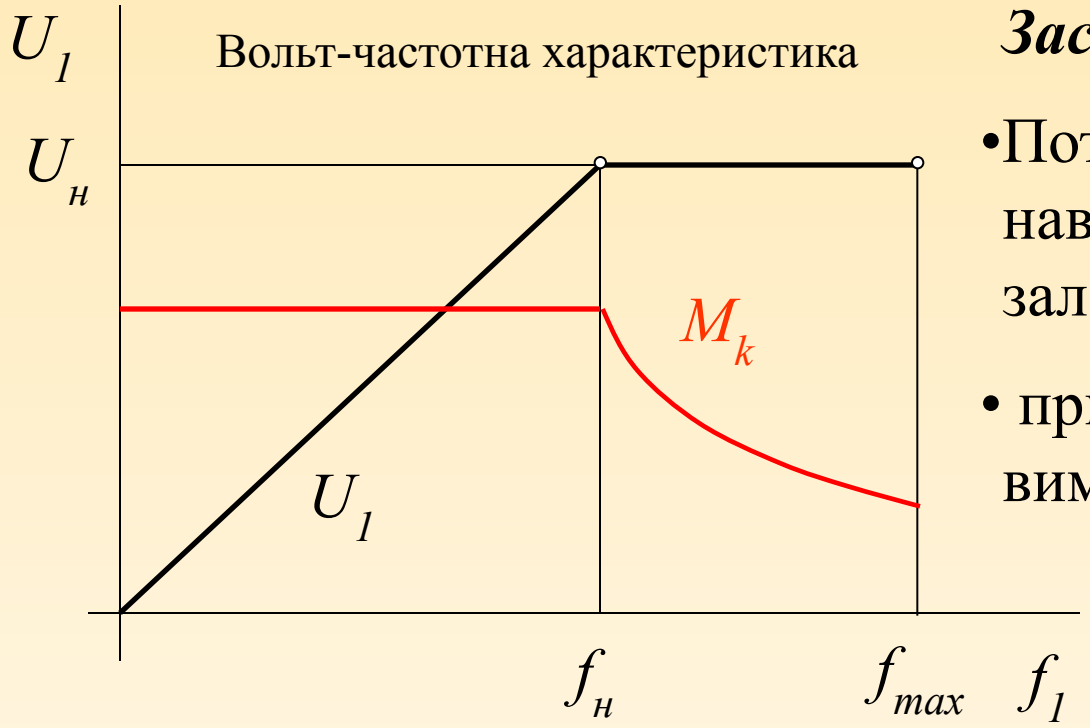
$$s_k = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}};$$



ЗАКОНИ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ

Коли $x_k >> r_1$

$$M_k \approx \frac{3pU_1^2}{2\omega_1 x_k} = \frac{3pU_1^2}{2L_k\omega_1^2} = \frac{3pU_1^2}{8\pi^2 L_k f_1^2} = const \text{ для } \frac{U_1}{f_1} = const;$$



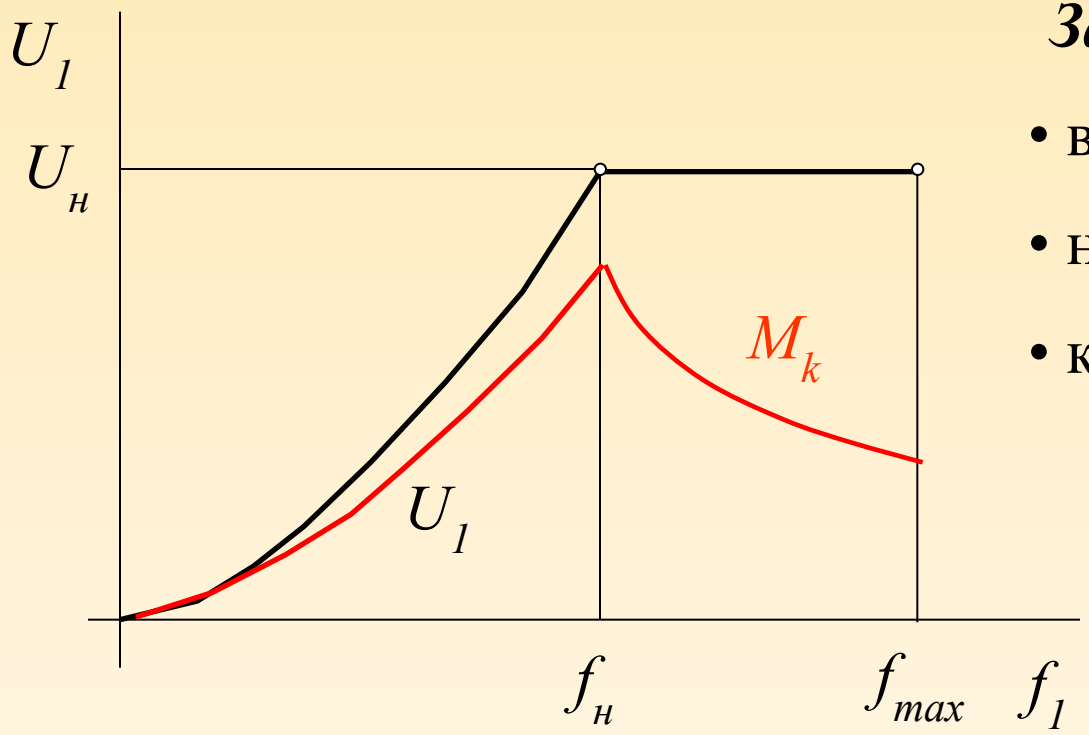
Застосування:

- Потужні АД з моментом навантаження , яке не залежить від швидкості;
- приводи з невисокими вимогами до точності

ЗАКОНИ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ

$$\textit{Для турбомеханізмів } M_c \approx c\omega^2 = c\frac{4\pi^2}{p^2} f_1^2$$

$$\frac{M_k}{M_c} = \frac{3p^3U_1^2}{8\pi^2 L_k f_1^2 4\pi^2 c f_1^2} = \frac{3p^3U_1^2}{32\pi^4 L_k c f_1^4} = const \text{ для } \frac{U_1}{f^2} = const;$$

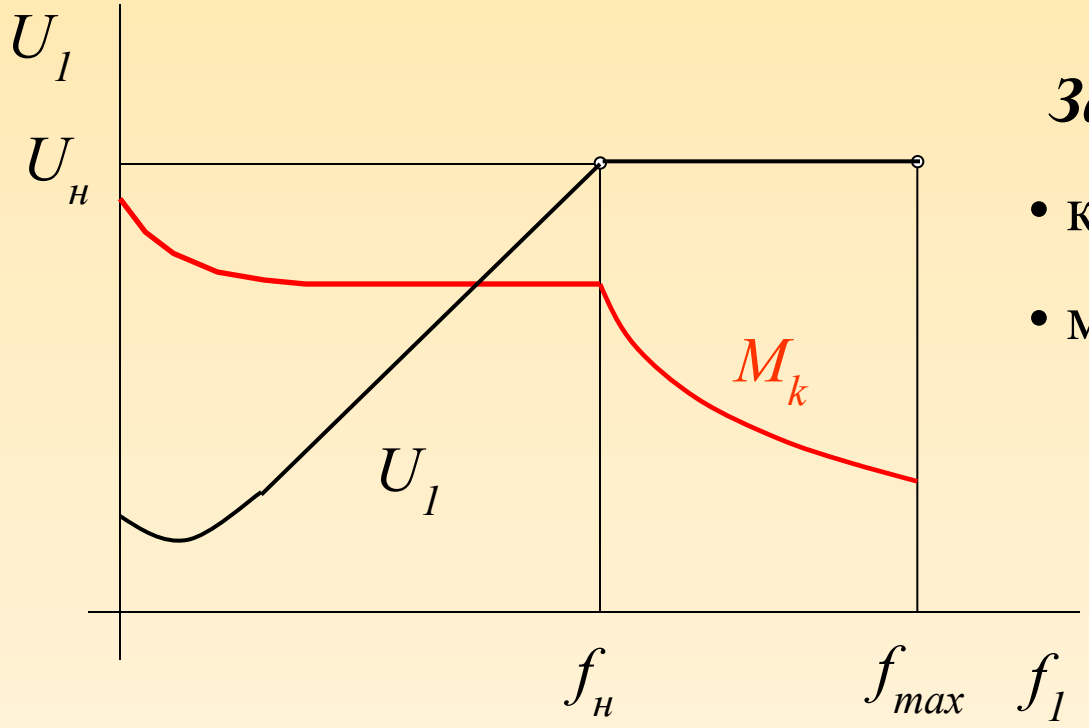


Застосування:

- вентилятори;
- насоси;
- компресори

ЗАКОНИ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ

Для механизмів з важким пуском



Застосування:

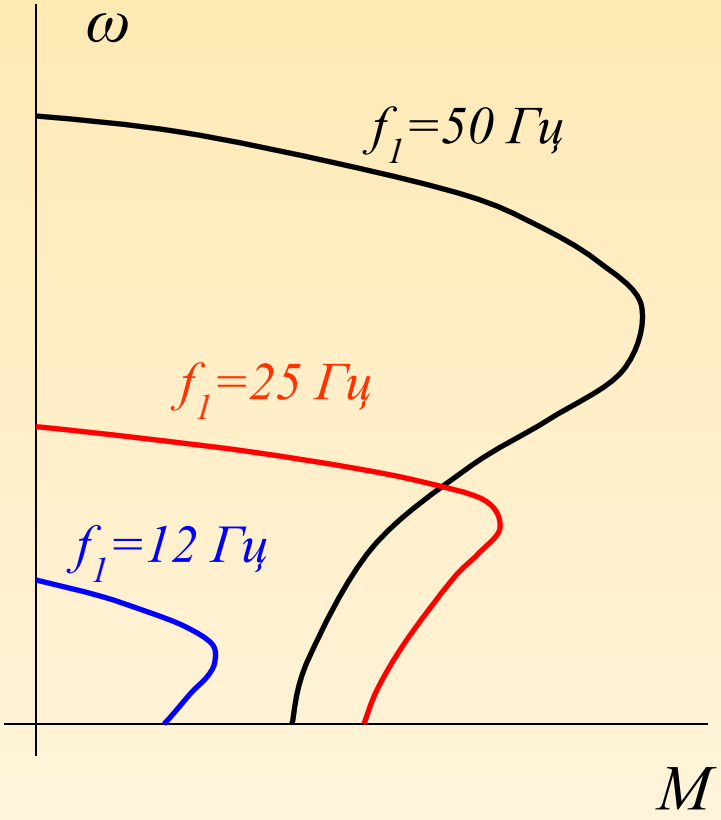
- конвейори
- млини, тощо

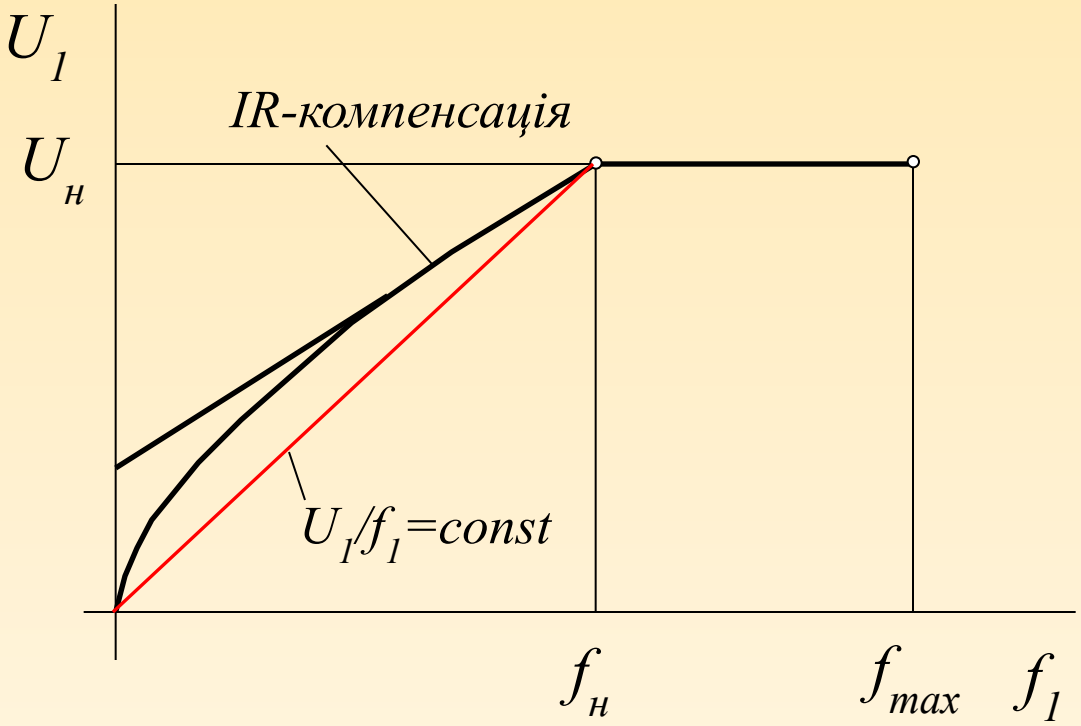
ЗАКОНИ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ

IR-компенсація

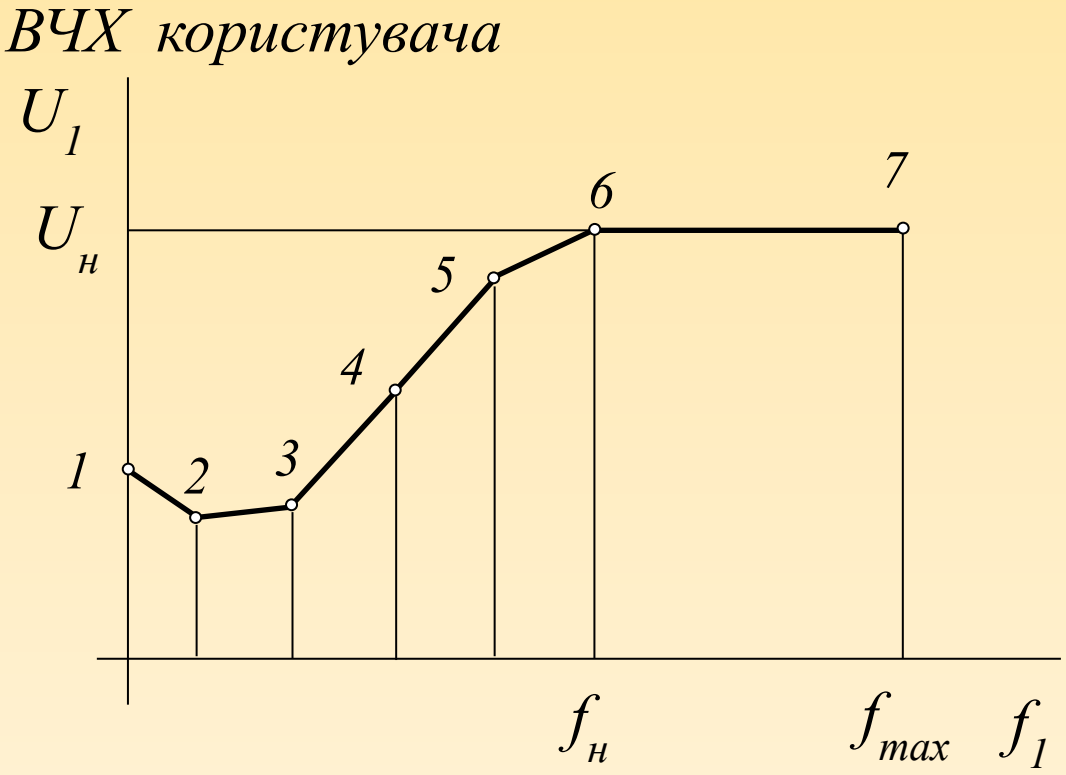
Застосування:

двигуни малої потужності





ЗАКОНИ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ

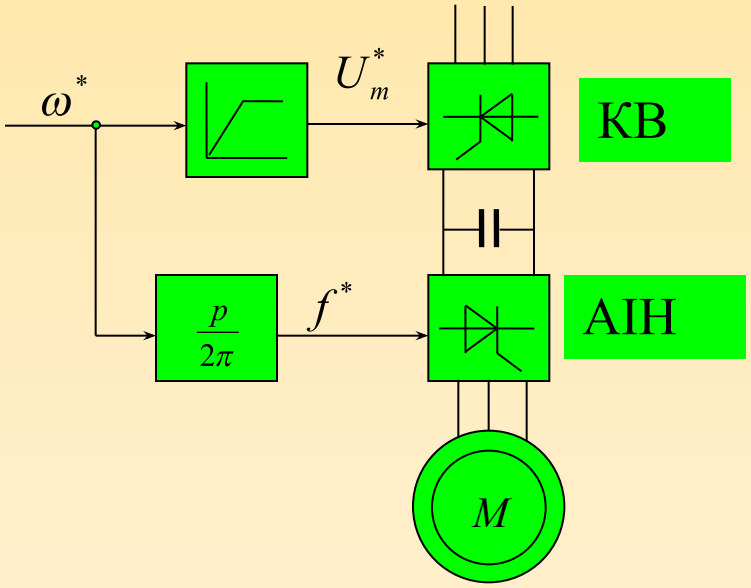


Застосування:

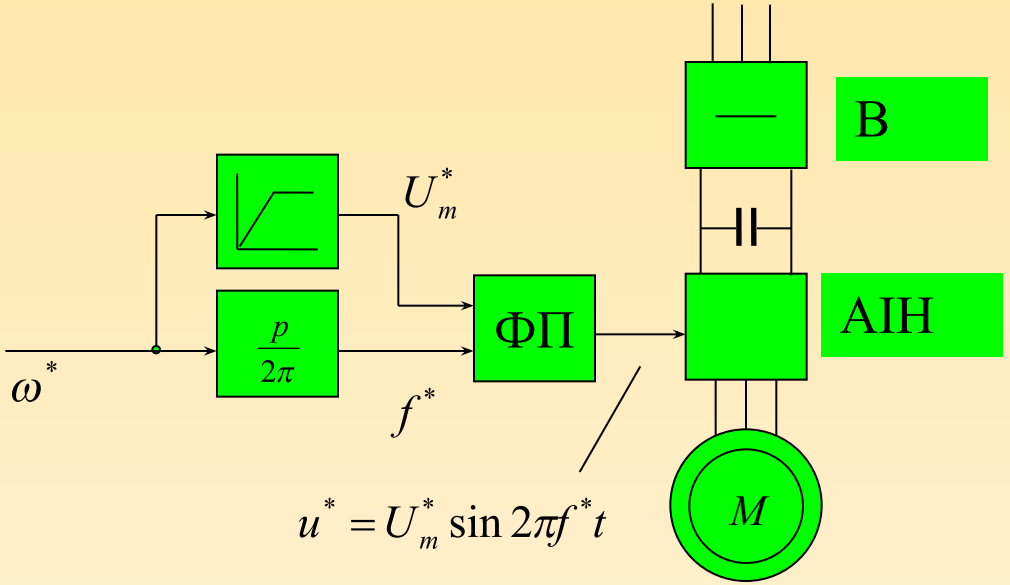
- реалізація особливих умов та вимог до вольт-частотної характеристики

СКАЛЯРНЕ КЕРУВАННЯ

Регулювання напруги (струму) та частоти



АІН з амплітудною модуляцією



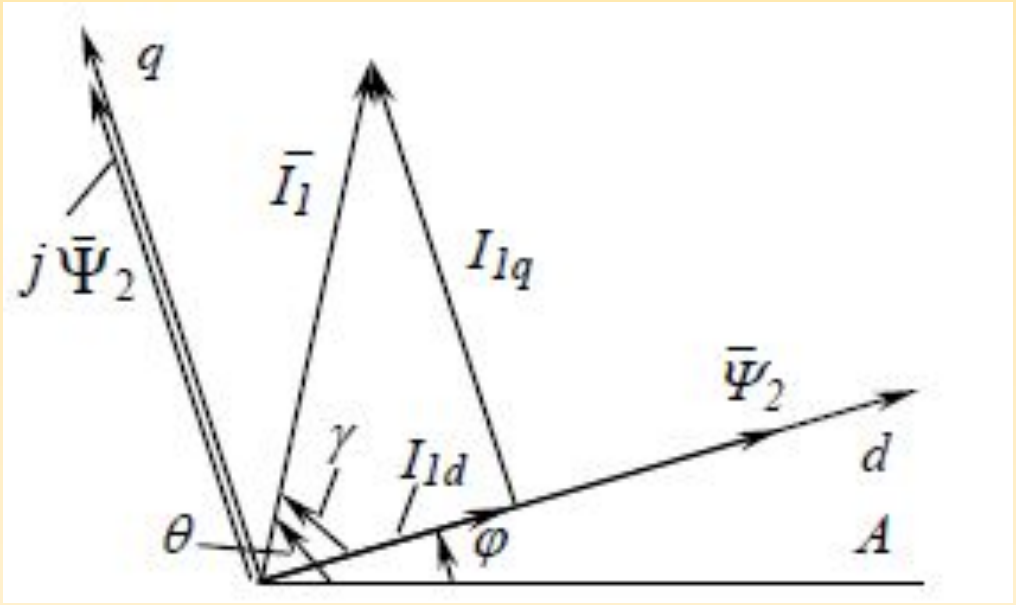
АІН з широтно-імпульсною модуляцією

Недоліки:

- низька швидкодія;
- відносно малий діапазон регулювання D=10-20

Векторне керування, принцип, особливості

$$M = k\,\mathrm{Im}\left(\underline{\Phi}_1 * \underline{I}_1\right)$$

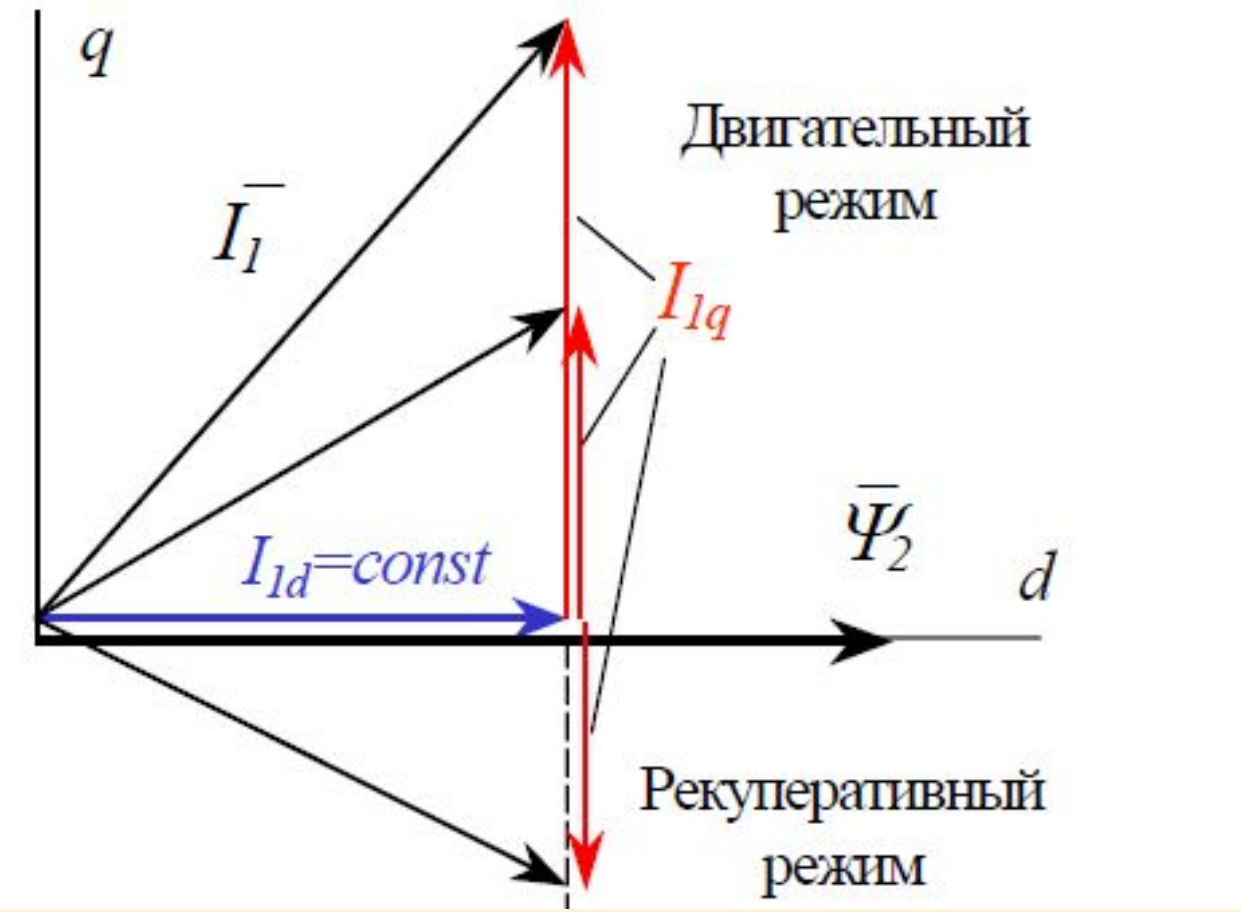


$$M = k\frac{L_{12}}{L_2}\Phi_2 I_{1q}$$

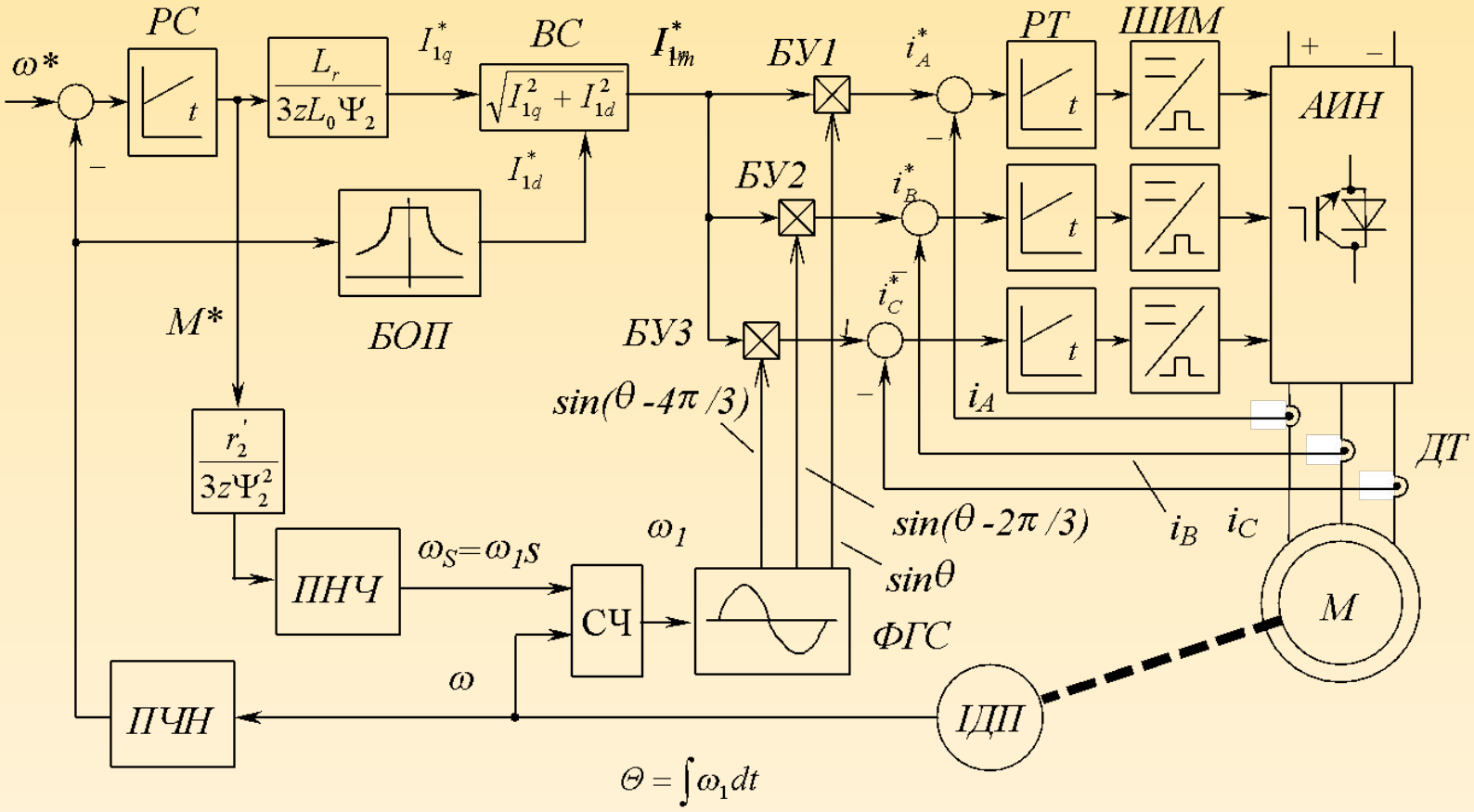
$$I_{d1} = \frac{T_2\dfrac{d\Phi_2}{dt} + \Phi_2}{L_{12}}$$

$$I_{q2} = \frac{L_2}{kL_{12}}\frac{M}{\Phi_2}$$

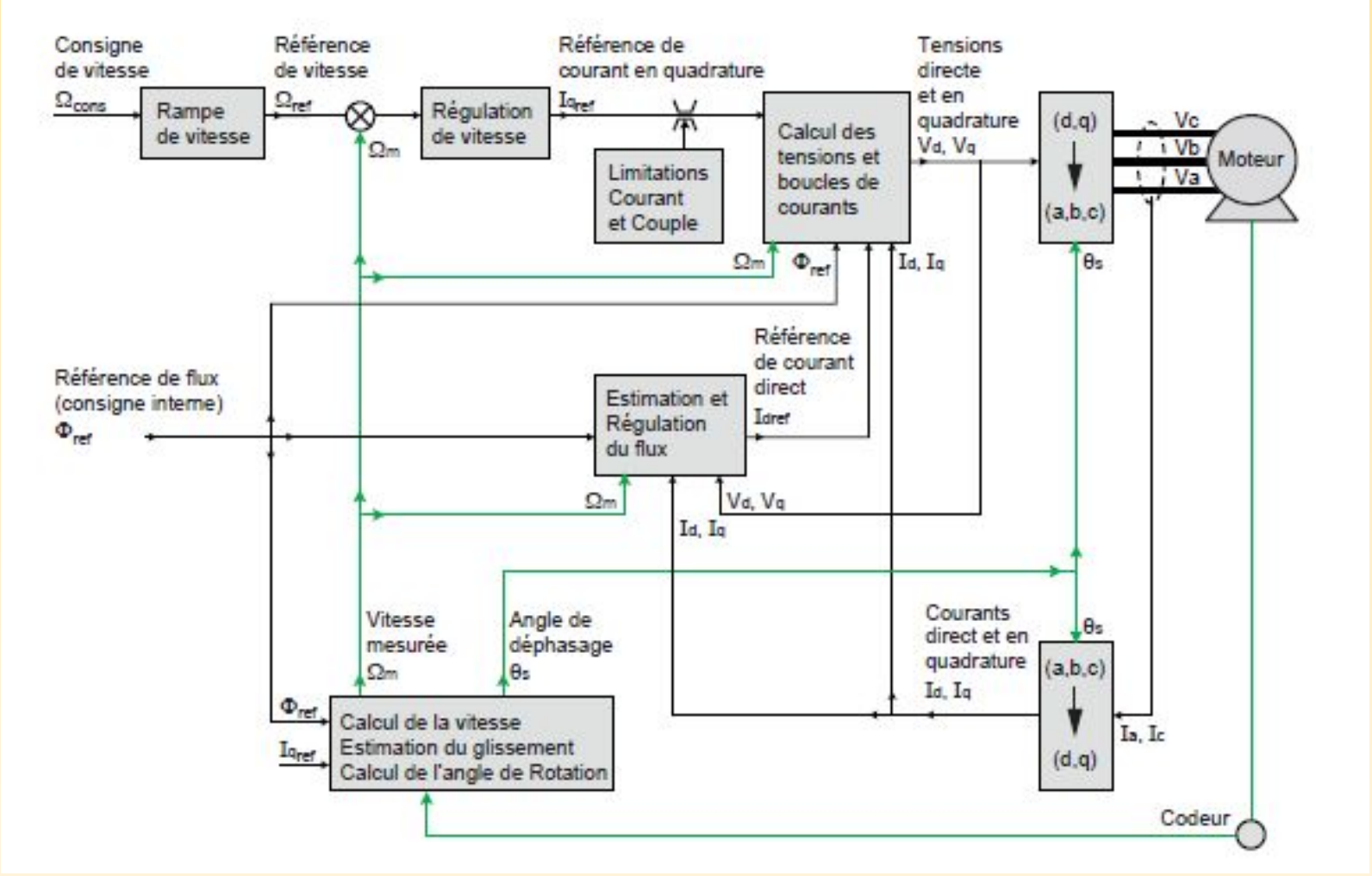
Векторне керування, режими АД



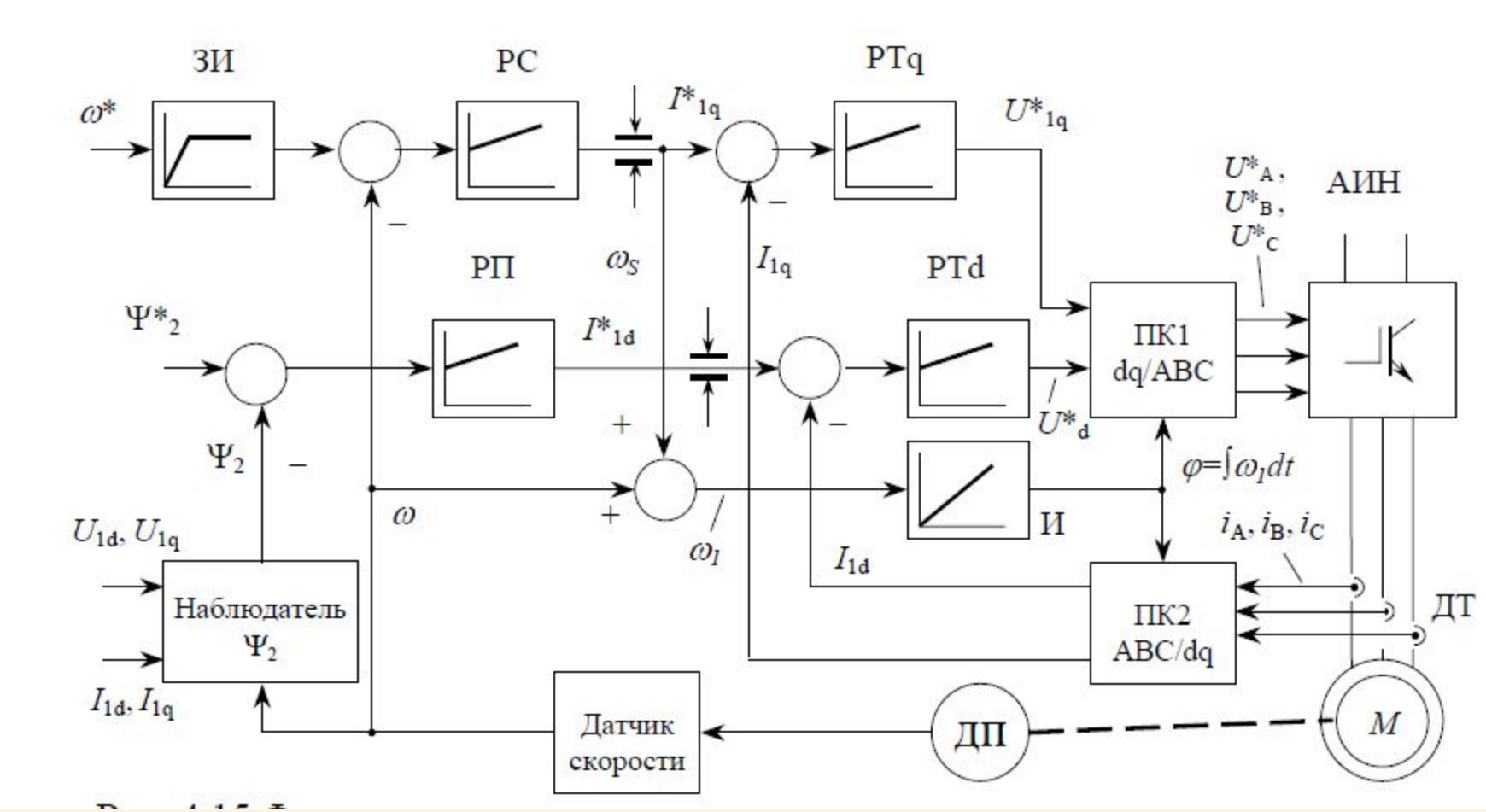
Векторне керування
приклад структурної схеми



Векторне керування

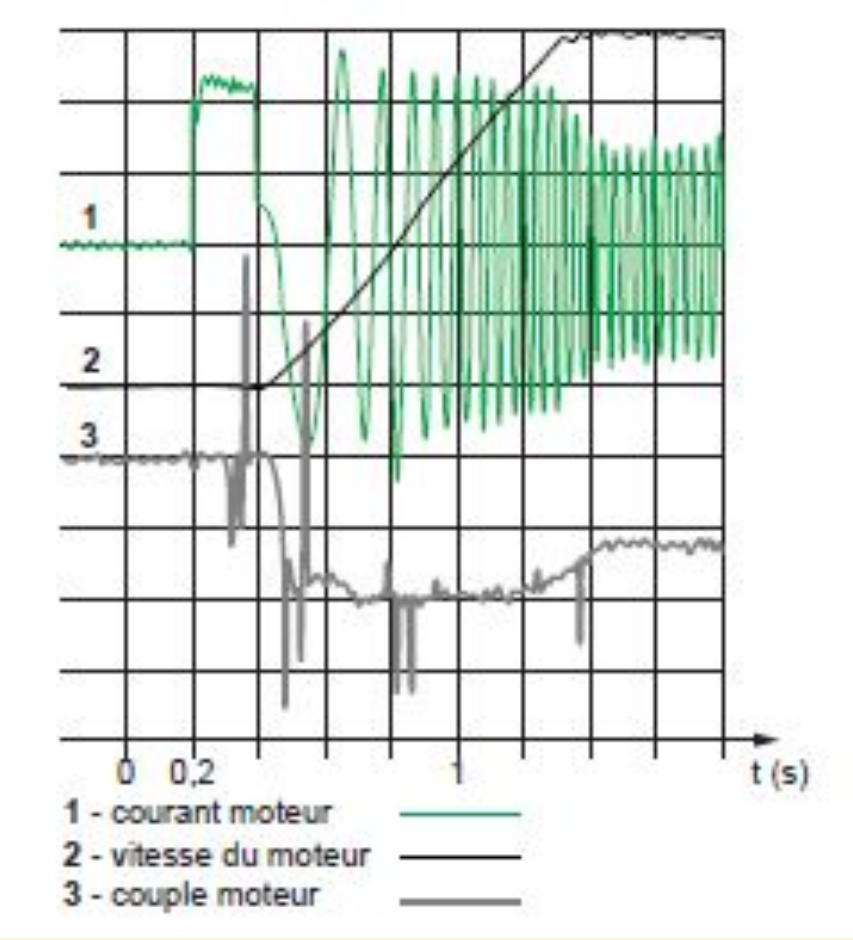


Векторне керування
функціональна схема САК (FVC)



Векторне керування

осцилограми пуску приводу з ПЧ типу ATV58F



БЕЗДАВАЧЕВЕ ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ (Sensorless vector control, SVC)

Передумови:

- трудність вимірювання магнітного потоку
- Не завжди є можливість встановлення давача швидкості (положення)

Принцип:

- вимірювання струмів з наступним розрахунком швидкості та моменту

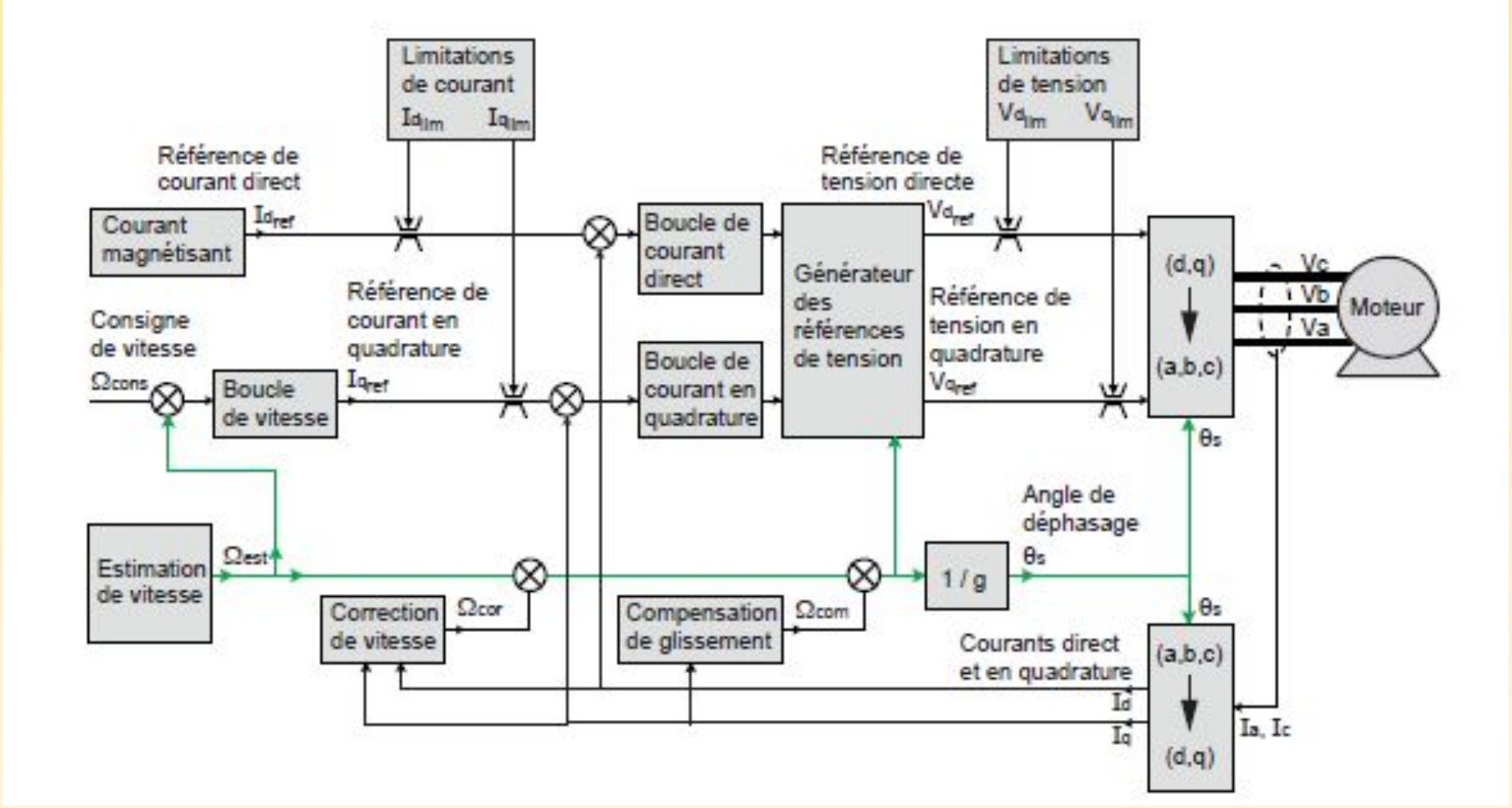
Переваги:

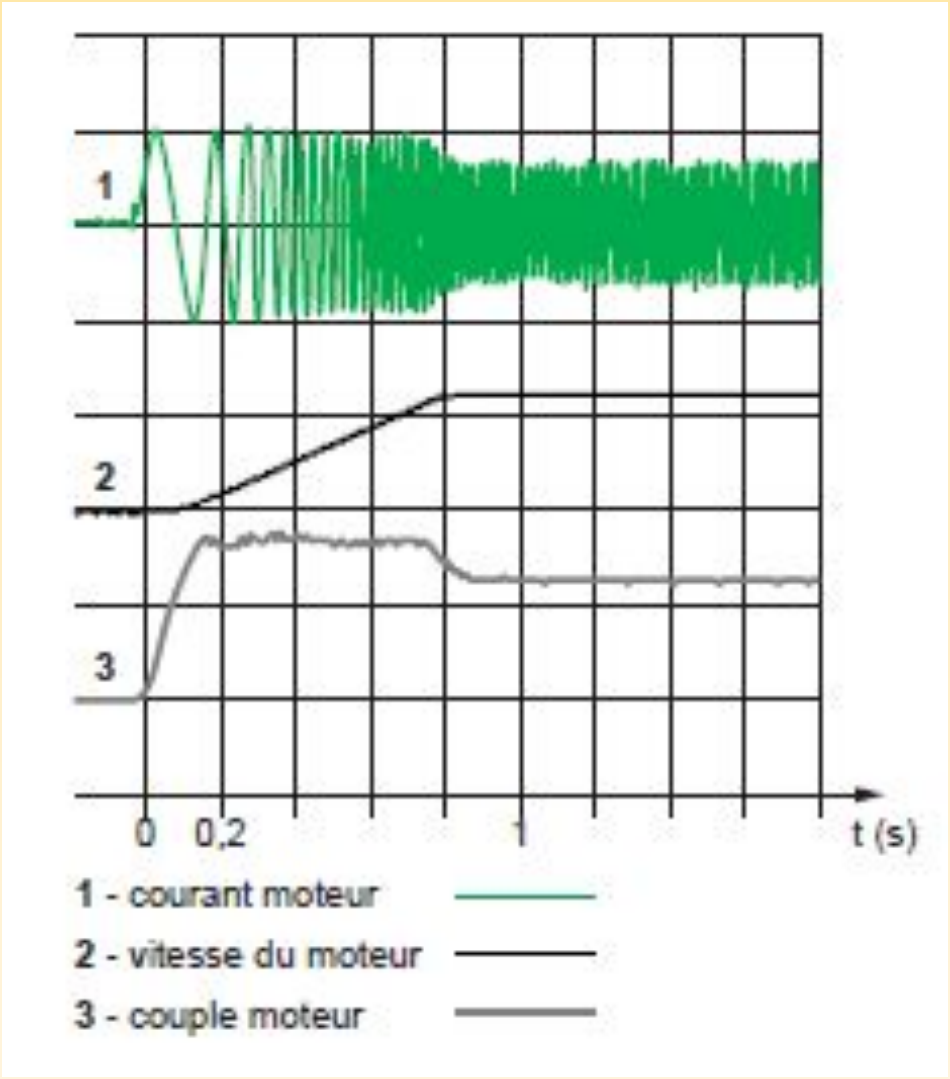
- Покращення регулювальних властивостей приводу без застосування давачів швидкості

Недоліки:

- діапазон регулювання, точність і швидкодія гірші, ніж при «повному» векторному керуванні. (з давачем швидкості)

Векторне керування
без давача швидкості (SVC)



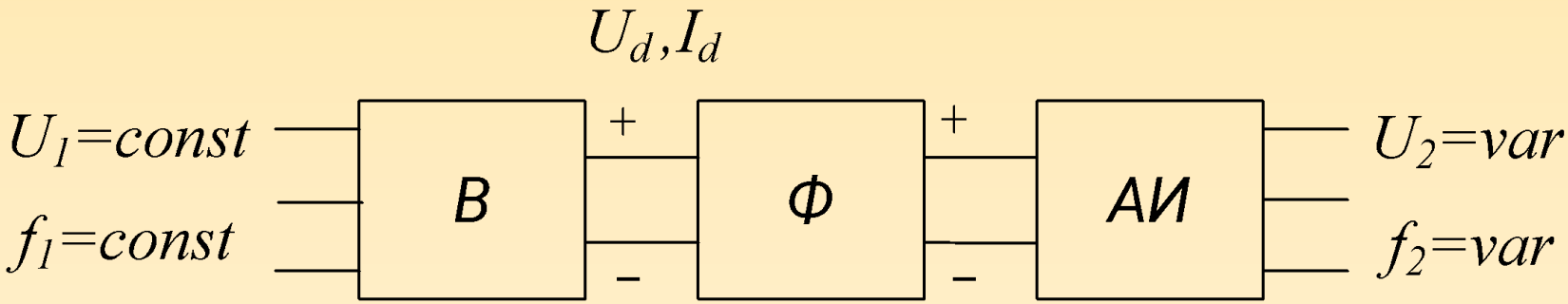

1
2
3
0
0,2
1
t (s)
1 - courant moteur
2 - vitesse du moteur
3 - couple moteur

Принцип роботи перетворювачів частоти

- *Принцип формування вихідної напруги: амплітудна та широтно-імпульсна модуляція*
- *Способи формування гальмівного режиму роботи двигуна*
- *Особливості роботи вхідного випрямляча*
- *Переваги ПЧ з ШІМ*
- *Основні вимоги до систем керування*
- *Функціональна та структурні схеми сучасного ПЧ типу Altivar*

Общая структура преобразователей частоты

Назначение ПЧ – преобразование энергии переменного тока неизменных уровня и частоты в энергию переменного тока с регулируемыми уровнем и частотой



Двухзвенный ПЧ

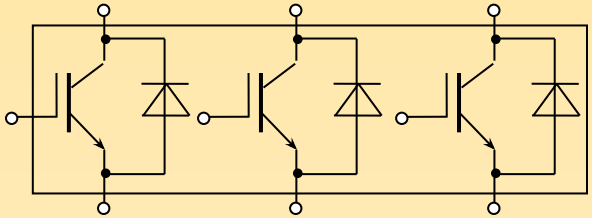
В – выпрямитель;

Ф – сглаживающий фильтр;

АИ – автономный инвертор

Силові напівпровідникові модулі

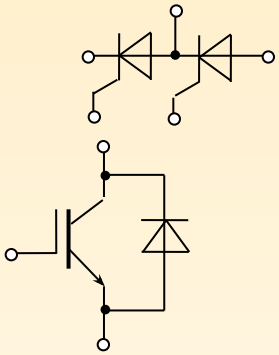
Особливості конструкції:

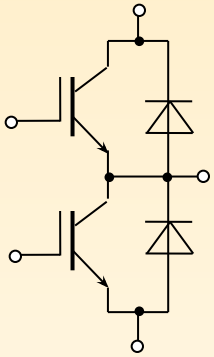


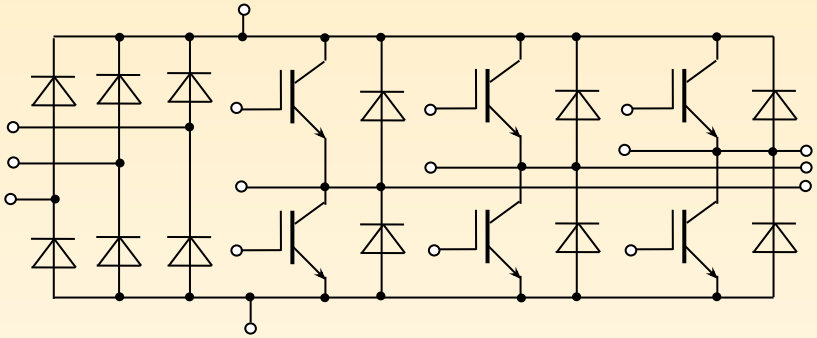
- об’єднання в модулі:
  - силового керованого ключа та зворотнього діода,
  - декількох ключів;
  - силової схеми цілого перетворювача енергії
- Напівпровідниковий кристал та електрична схема ізольовані від основи

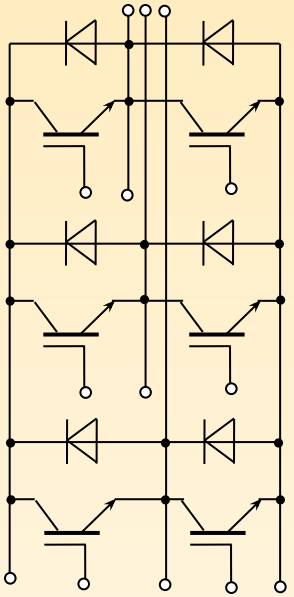
Переваги:

- зменшення габаритів;
- спрощення конструкції ПЧ та його вартості;
- Підвищення надійності;
- збільшення швидкодії



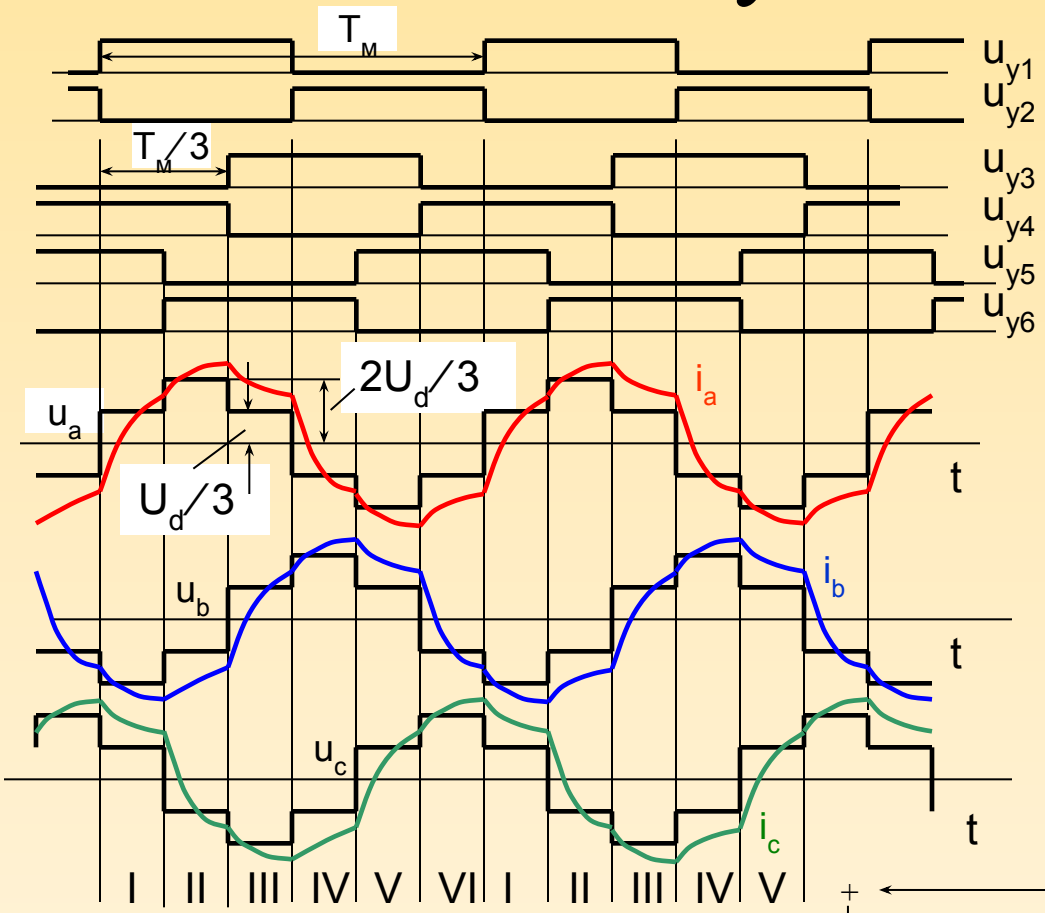


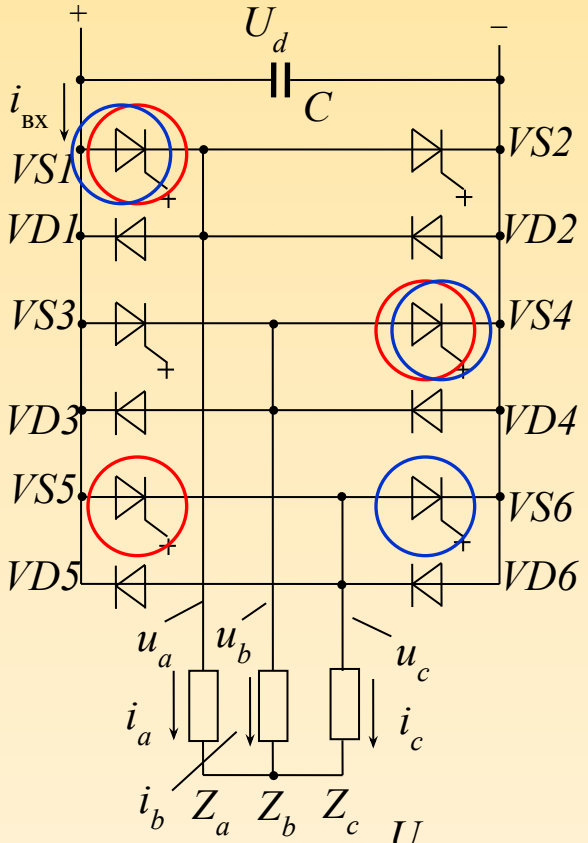


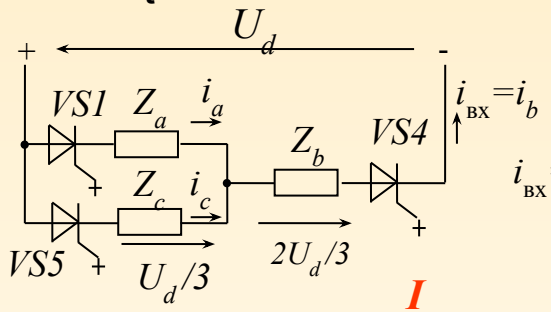


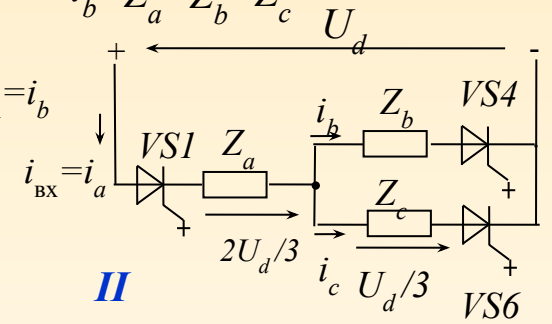
E
G
E

Трифазний АІН з амплітудної модуляції



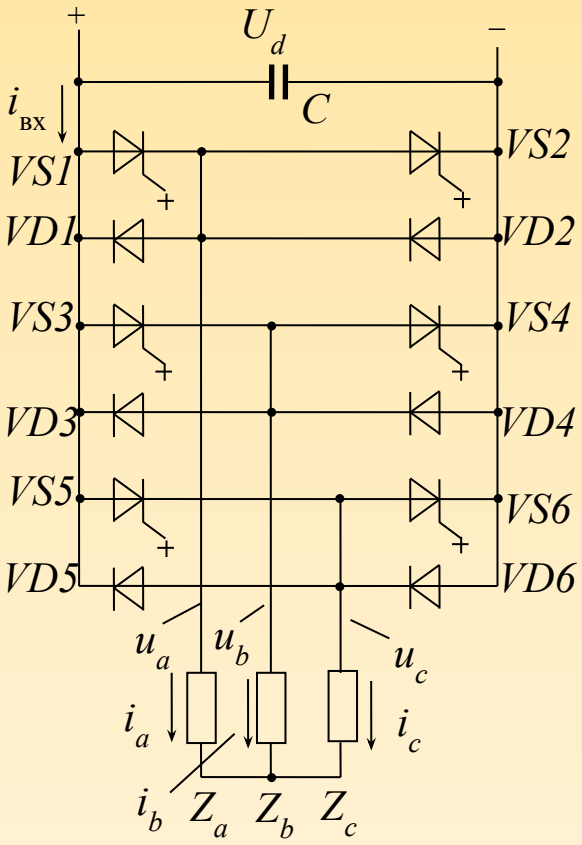






Трехфазный АИН
Основные принципы управления

- для обеспечения непрерывности выходного тока управляющие импульсы всегда присутствуют на трех ключах (по одному в каждой фазе);
- во избежание сквозного короткого замыкания источника постоянного тока не могут быть одновременно открыты оба ключа одной фазы;
- выходной ток фазы после коммутации в ней не может измениться скачком;
- после запирания ключа отпирается обратный диод в той же фазе, который обеспечивает протекание фазного тока в том же направлении, что и до запирания ключа



Амплітудна модуляція в ПЧ

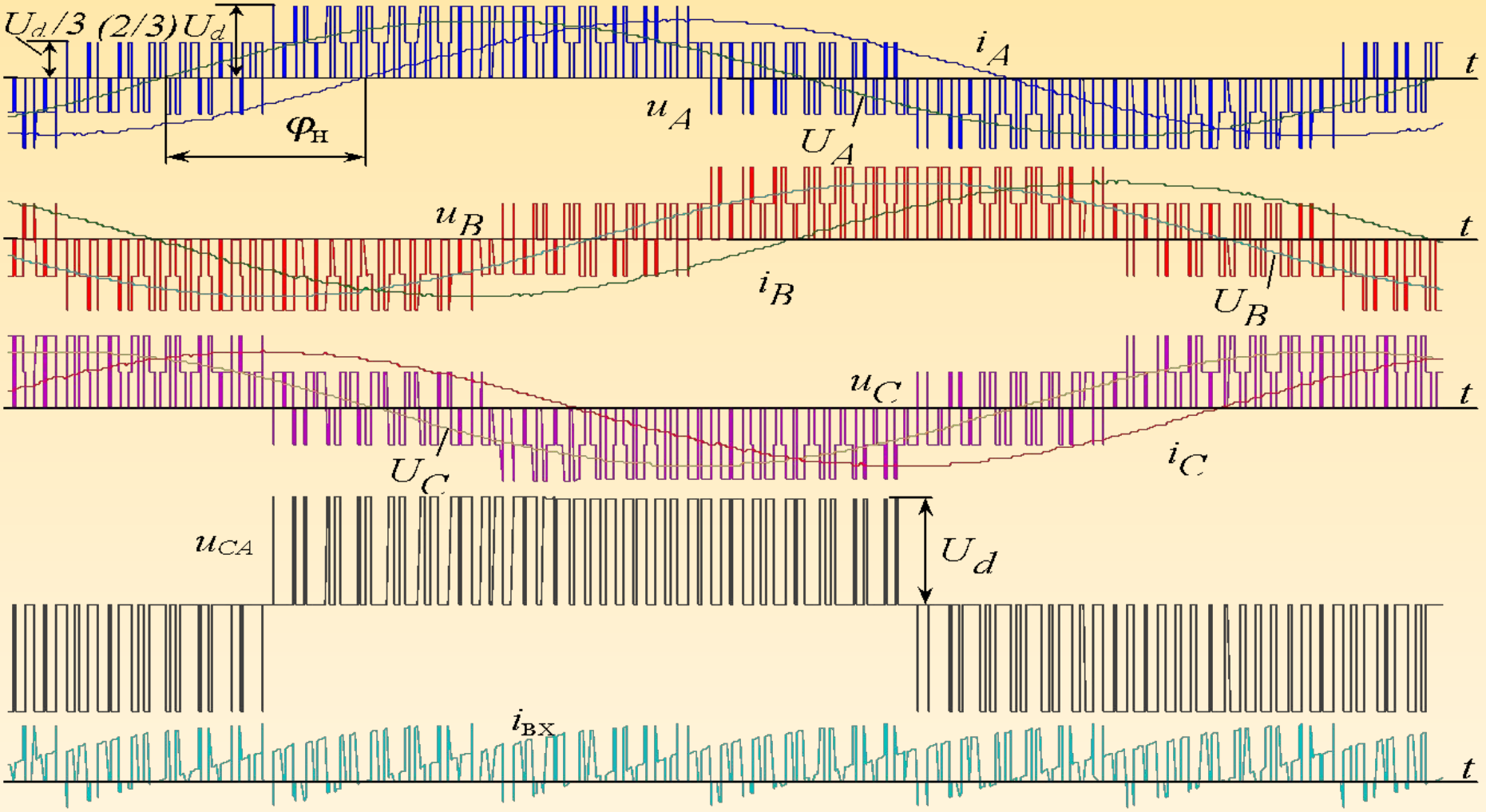
Переваги:

- простота алгоритму керування інвертором
- малі втрати в ключах інвертора

Недоліки:

- необхідність використання двох керованих перетворювачів;
- суттєва несинусоїдальність струмів двигуна;
- вузький діапазон регулювання швидкості двигуна;
- низький вхідний коефіцієнт потужності , несприятловий вплив на мережу живлення

Трехфазный АИН с широтно-импульсной модуляцией



Широтно-импульсная модуляция в ПЧ

Преимущества:

- входной выпрямитель может быть неуправляемым;
- практически синусоидальная форма выходного тока;
- возможность глубокого регулирования скорости;
- Cosϕ близкий к 1;
- возможность питания нескольких АИН от общего выпрямителя

Недостатки:

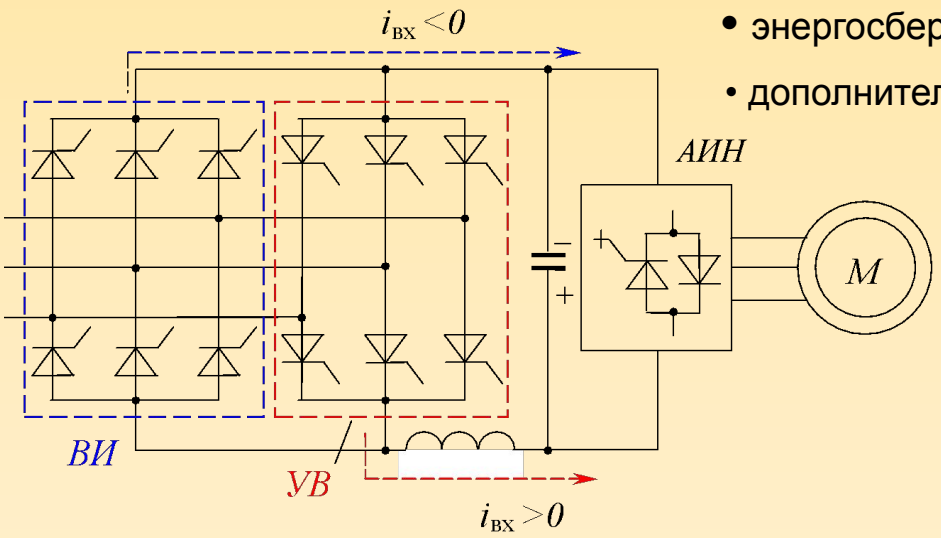
- необходимость применения более дорогих ключей;
- повышенные потери в ключах вследствие высокой частоты их переключения;
- повышенное излучение электромагнитных помех;
- возможность перенапряжений на обмотке двигателя при большой длине кабеля

Области применения:

- электроприводы с повышенными требованиями к точности, диапазону регулирования скорости или энергетическим показателям;
- силовые активные фильтры для систем электроснабжения;
- источники бесперебойного питания

Способы торможения в электроприводах с ПЧ

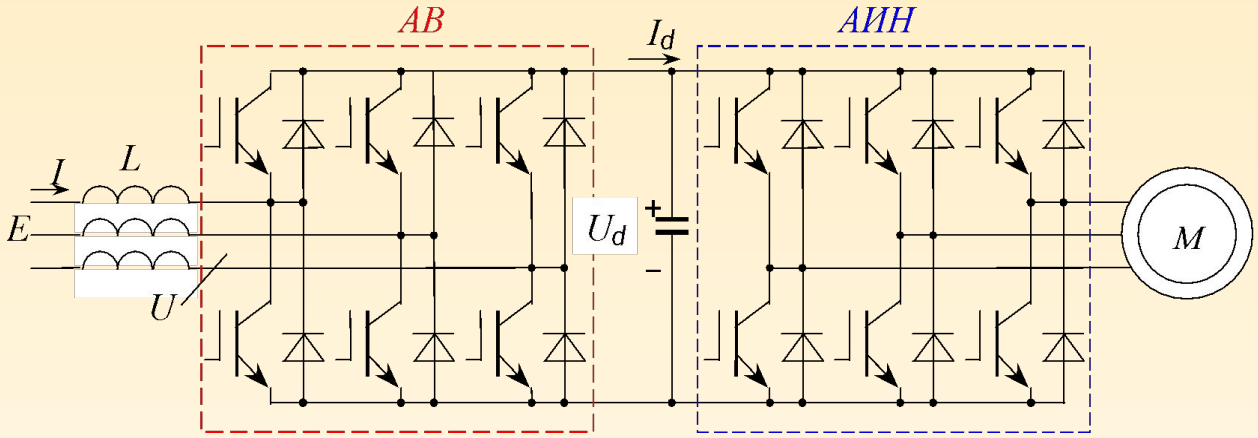
Рекуперативное с возвратом энергии в сеть:



- энергосбережение;
- дополнительные капитальные затраты

С ведомым сетью инвертором (ВИ):

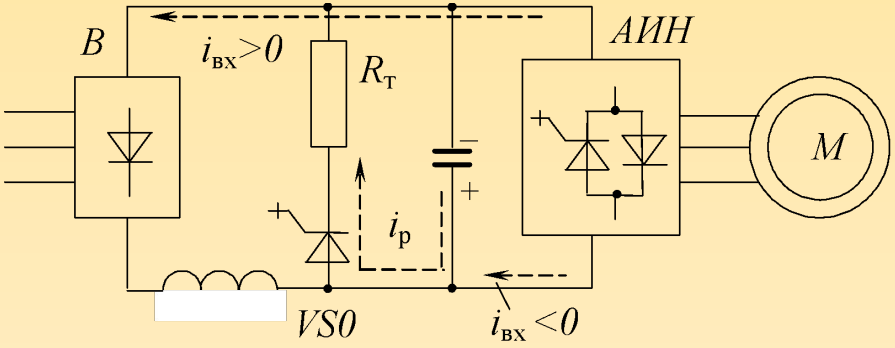
- несинусоидальная форма тока сети;
- cosϕ<1



С активным выпрямителем (АВ)

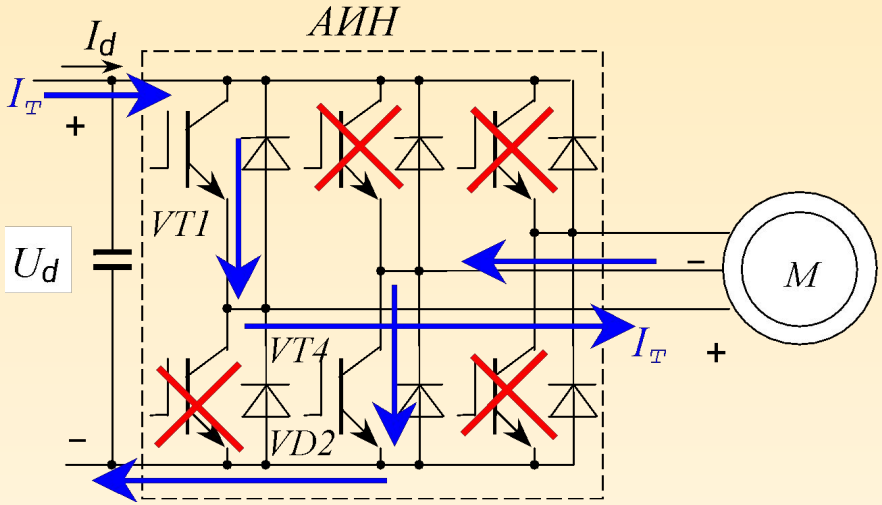
- синусоидальная форма тока сети;
- cosϕ=1

Способы торможения в электроприводах с ПЧ



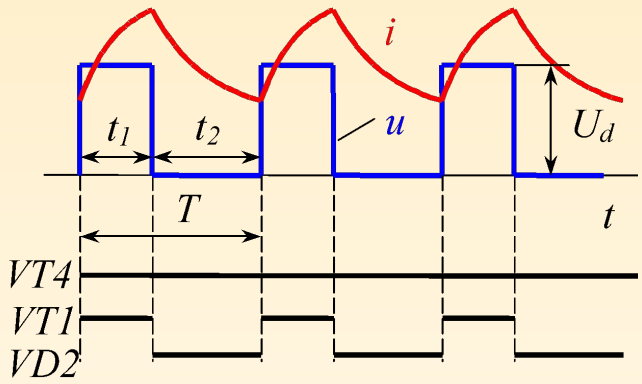
Рекуперативное с разрядным резистором:

- тормозная энергия рассеивается в резисторе;
- дополнительные капитальные затраты невелики

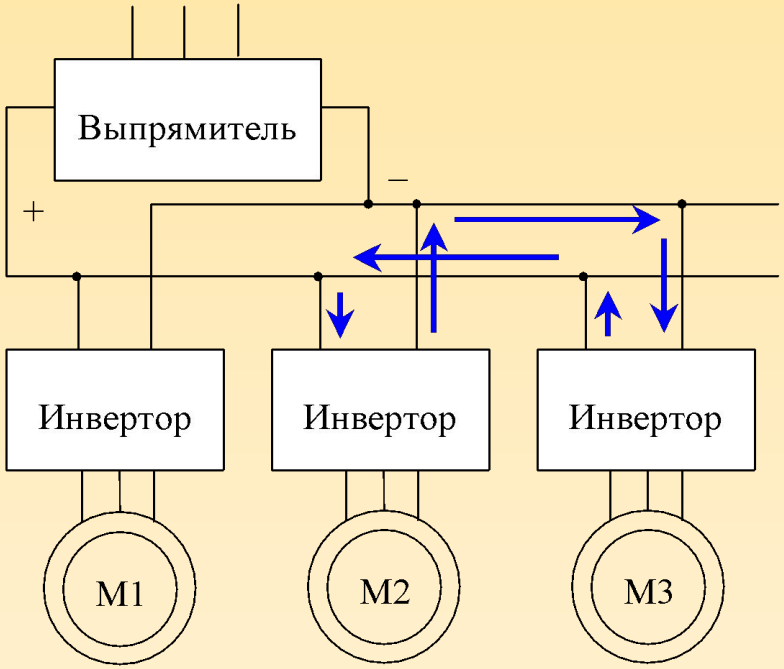


Динамическое торможение (торможение постоянным током)

- тормозная энергия рассеивается в двигателе;
- дополнительные капитальные затраты отсутствуют



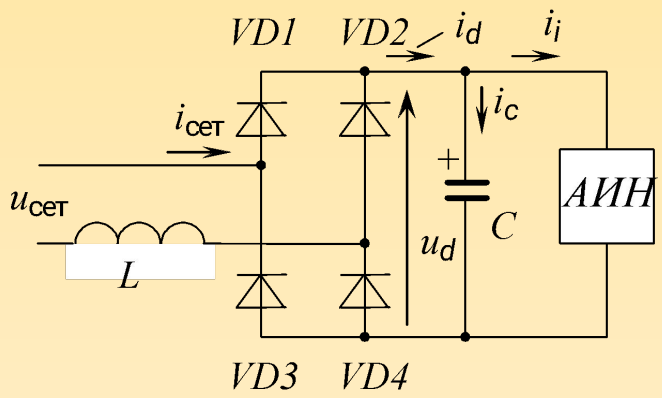
Способы торможения в электроприводах с ПЧ



Обмен тормозной энергией по сети постоянного тока:

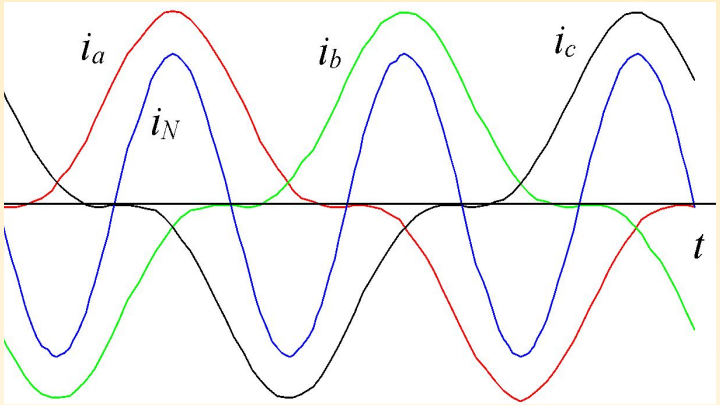
- рекуперируемая энергия может быть использована другими потребителями;
- мощность выпрямителя меньше суммы мощностей инверторов;
- целесообразно использование в многодвигательных механизмах

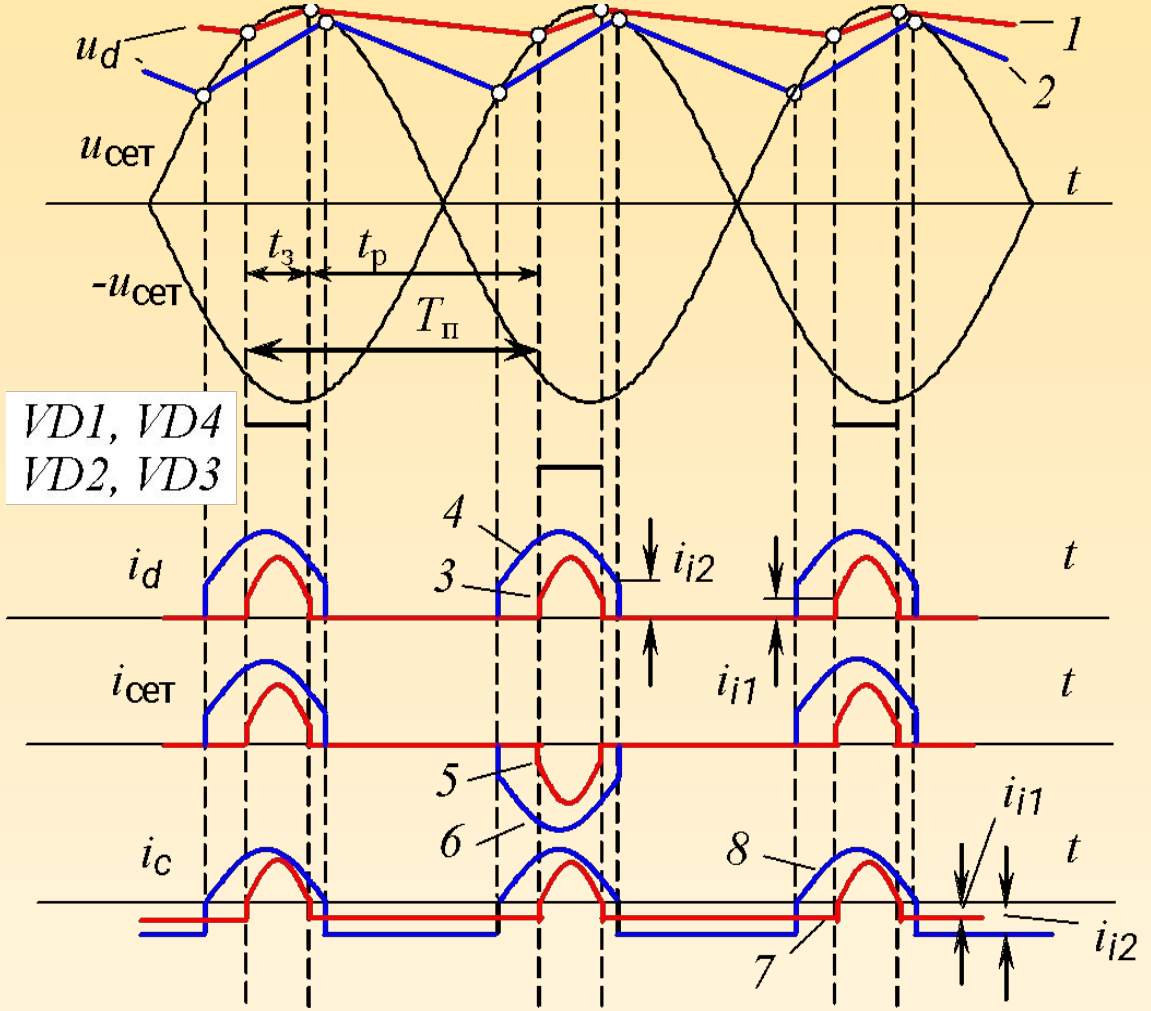
Входные выпрямители двухзвенных ПЧ



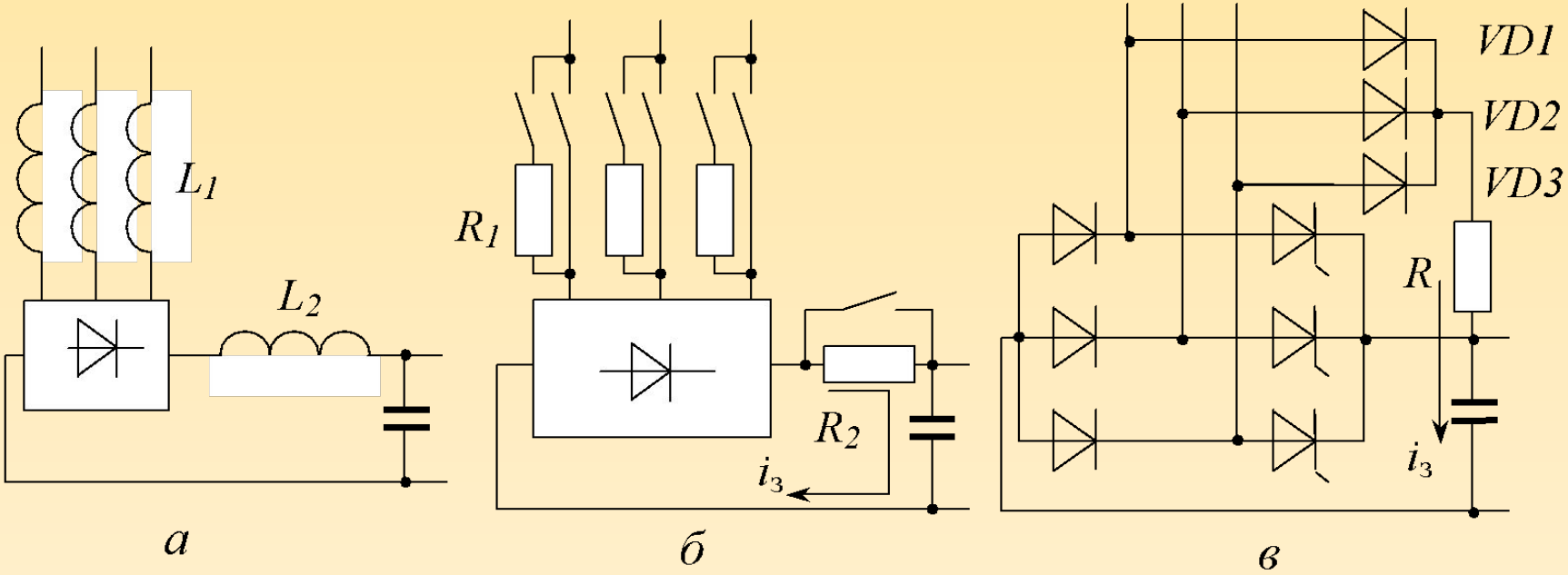
Особенности:

- выпрямленный ток прерывистый;
- потребляемый из сети ток существенно несинусоидальный





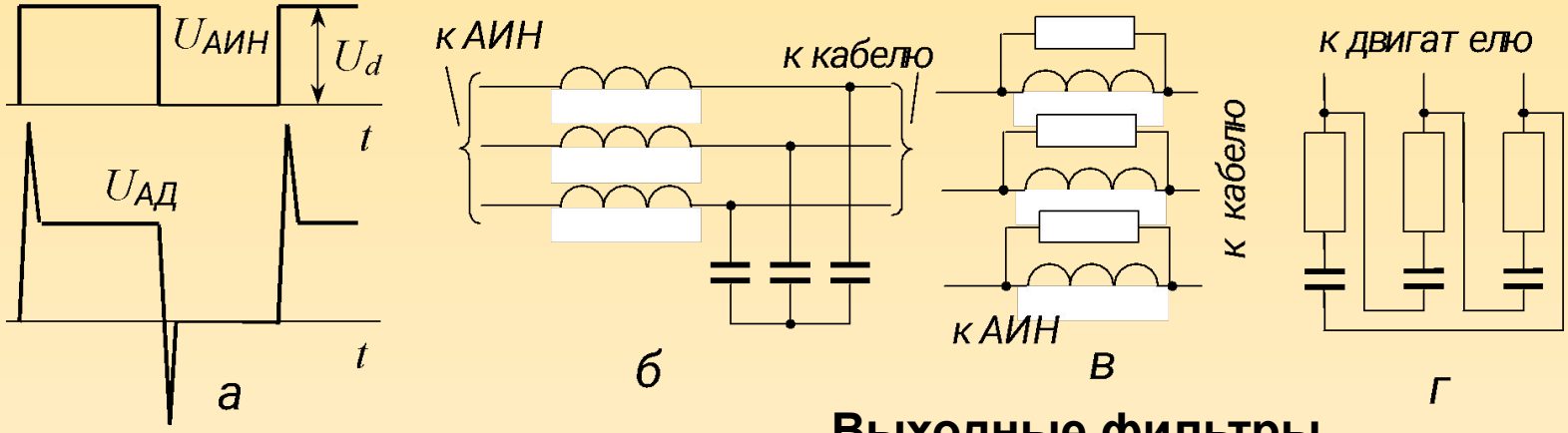
Ограничение зарядного тока



Цель:

- снижение тока заряда конденсатора при первом подключении ПЧ сети

Перенапряжения на выходе АИН



Выходные фильтры

Причины:

- быстрый темп изменения выходного напряжения АИН при переключениях ключей;
- проявление волновых свойств длинного кабеля

Следствия:

- перенапряжения на обмотке статора двигателя (до двойного по сравнению с номинальным напряжением);
- рост емкостных токов утечки в кабеле;
- более интенсивное электромагнитное излучение кабеля

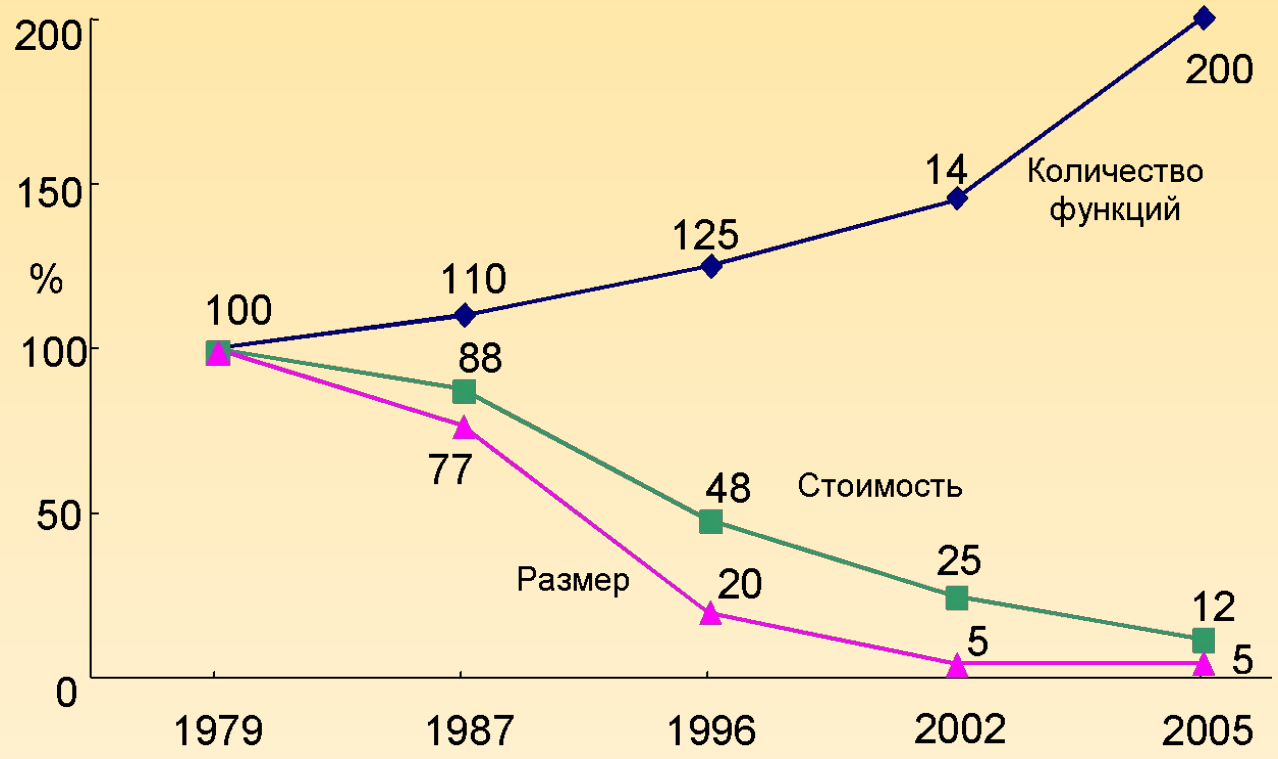
ТРЕБОВАНИЯ К ПЧ

- регулирование (как согласованное, так и раздельное) частоты и уровня выходного напряжения в широких границах;
- форма выходного тока, максимально приближенная к синусоидальной;
- способность к кратковременным перегрузкам;
- создание условий для протекания тормозных токов двигателя;
- минимальное внутреннее сопротивление для обеспечения максимальной жесткости механических характеристик електропривода;
- высокое быстродействие;
- легкость интеграции в системы автоматизации высшего уровня;
- высокие КПД и коэффициент мощности;
- высокая надежность;
- удобство и безопасность наладки и эксплуатации;
- минимальные генерируемые электромагнитные помехи и акустический шум;
- минимальные габариты и масса;
- уровень защиты от влияния окружающей среды, соответствующий условиям эксплуатации;
- возможность выбора комплектации в зависимости от решаемых задач и условий эксплуатации

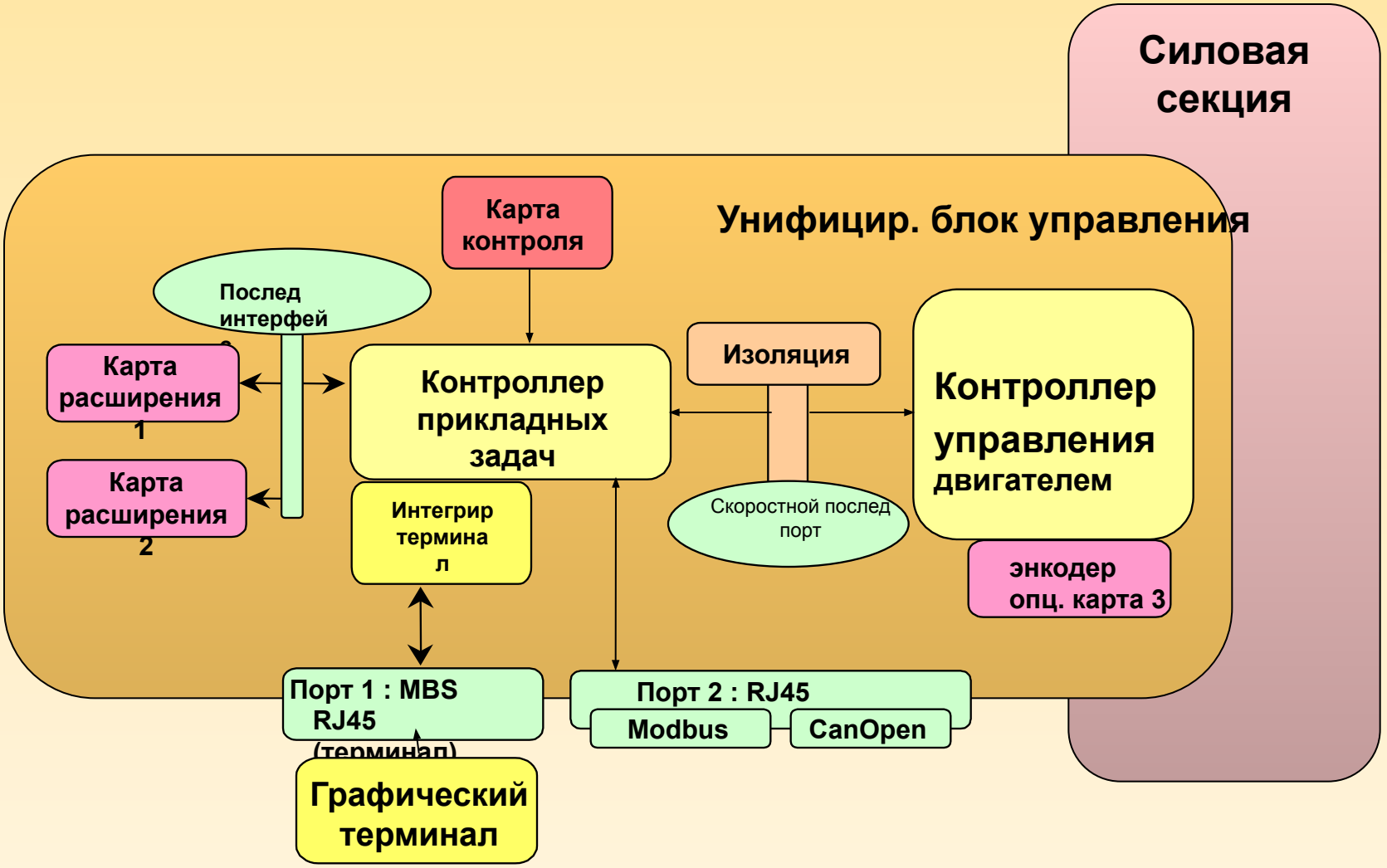
ЗАДАЧИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПЧ

- формирование логических сигналов управления ключами (т.е. управление самим ПЧ);
- управление координатами електропривода (током, скоростью);
- управление технологическим параметром (положением рабочих органов, давлением, натяжением, производительностью и т.п.);
- диагностирование и защита узлов и элементов преобразователя и электропривода в целом;
- программирование и настройка ПЧ и системы управления электроприводом;
- обеспечение диалога с пользователем и системой автоматизации высшего уровня.

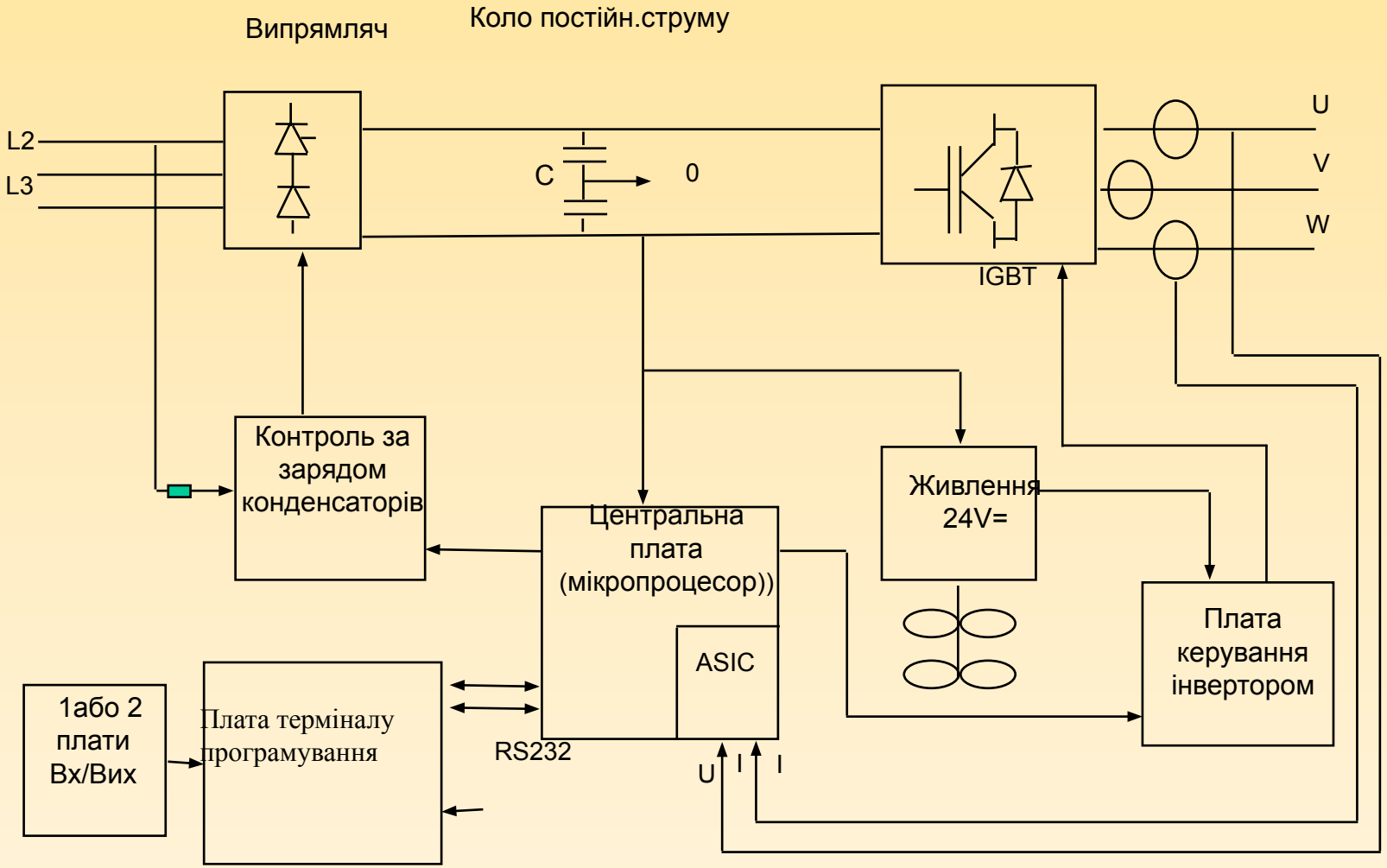
РАЗВИТИЕ ПЧ


200
150
%
100
50
0
1979
1987
1996
2002
2005
100
110
125
14
200
Количество функций
88
48
25
12
Стоимость
77
20
5
5
Размер

Структурна схема електроприводу ATV71



Функціональна схема Altivar



Електроприводи Altivar від SE

Прості механізми

ATV11

0,18- 2,2 кВт

ATV31

0,18-15 кВт

Складні механізми

ATV71

0,37-500 кВт

Вентилятори, насоси

ATV61

0,37-630 кВт

Установки кондиц. та вентиляцыъ

ATV21

0,75-30 кВт

ALTiSTART 01

ATS01

1,1-75кВт

ALTiSTART 48

ATS48

4 - 1200 кВт

Оновні функціональні можливості електроприводів Altivar

- Формування статичних та динамічних характеристик електроприводу(механізму)
- Формування команд та режимів роботи адаптованих до конкретного механізму
- Організація діалогу з оператором та/або АСУ ТП
- Моніторинг стану (діагностика) та захист системи

Формування команд та режимів роботи адаптованих до конкретного механізму

Каналы управления и задания

Управляющие команды (вперед, назад, стоп и т.д.) и задание могут подаваться по следующим каналам:

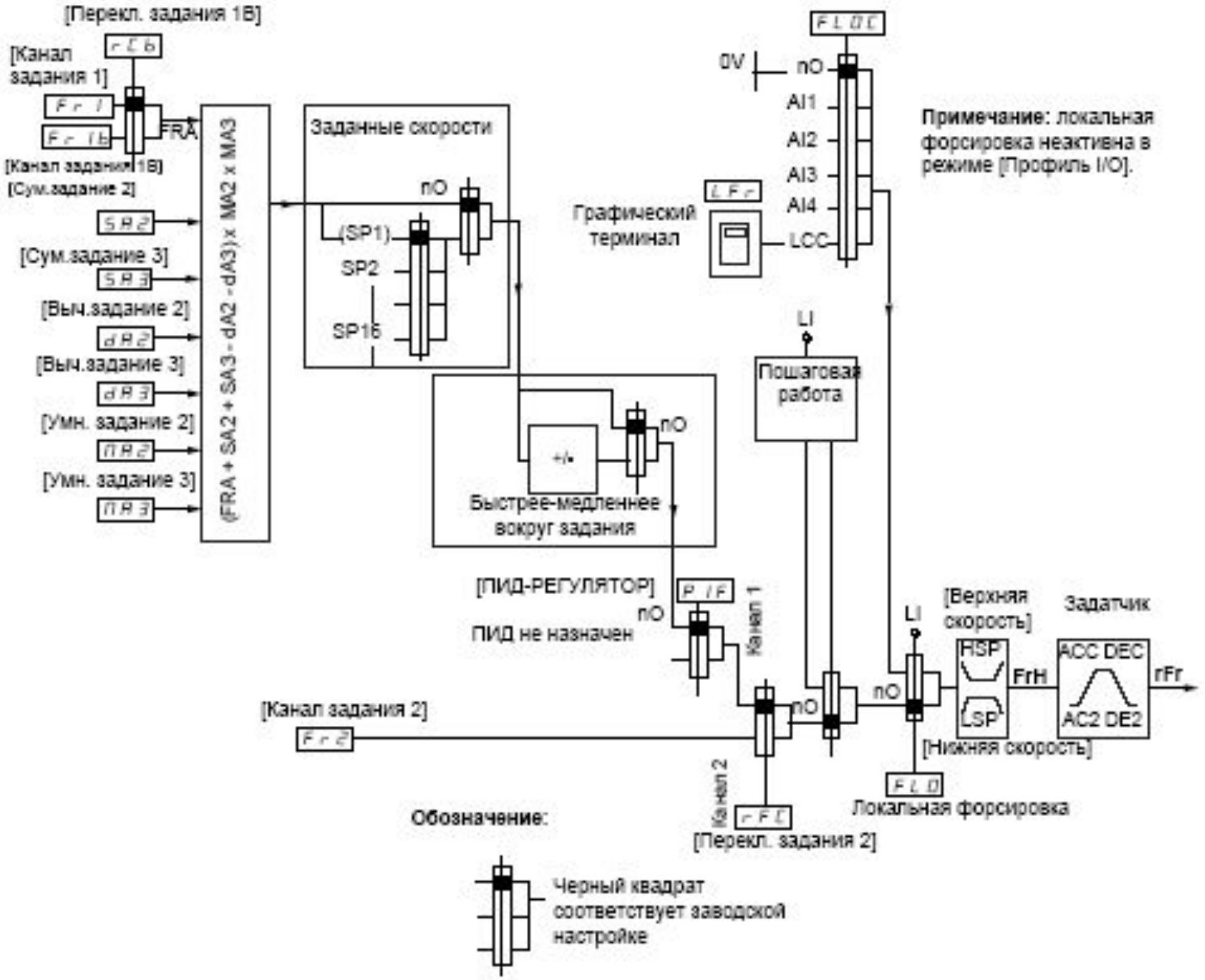
Управление	Задание
• Клеммник: дискретные входы LI • Графический терминал • Встроенный Modbus • Встроенный CANopen • Коммуникационная карта • Карта ПЛК	• Клеммник: аналоговые входы AI, импульсный вход, импульсный датчик • Графический терминал • Встроенный Modbus • Встроенный CANopen • Коммуникационная карта • Карта ПЛК • Быстрее-медленнее с помощью клеммника • Быстрее-медленнее с помощью графического терминала

Сравнение меню, доступных с графического и встроенного терминалов

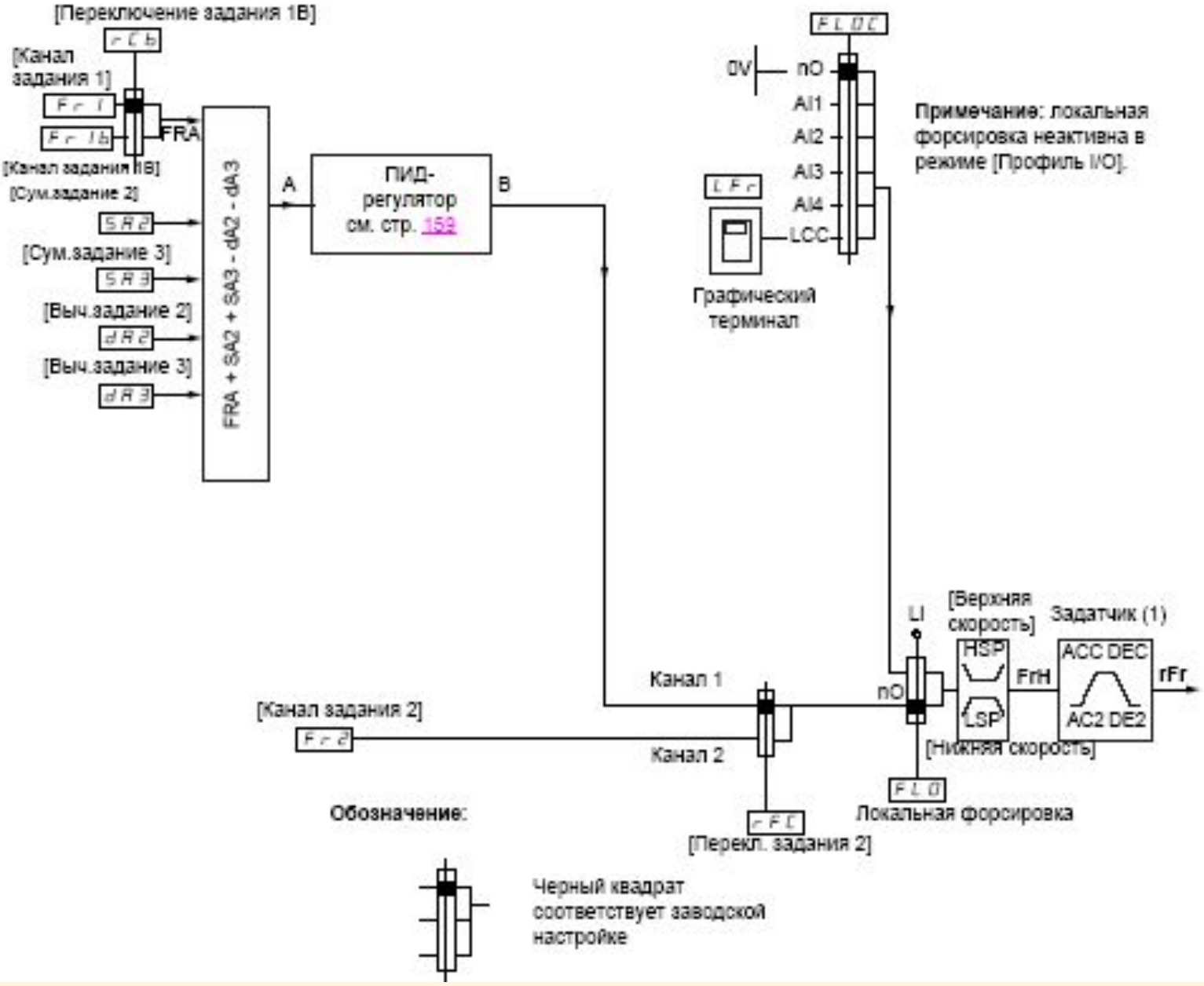
Графический терминал		Встроенный терминал	Уровень доступа
[2 УРОВЕНЬ ДОСТУПА]		LAC- (Уровень доступа)	БАЗОВЫЙ bAS
[3 ОТКРЫТЬ/СОХРАНИТЬ]		-	
[4 ПАРОЛЬ]		COd- (Пароль)	
[5 ЯЗЫК]		-	
[1 МЕНЮ ПЧ]	[1.1 УСКОРЕННЫЙ ЗАПУСК]	SIM- (Ускоренный запуск)	
	[1.2 МОНИТОРИНГ]	SUP- (Мониторинг)	
	[1.3 НАСТРОЙКА]	SEt- (Настройка)	
	[1.11 ИДЕНТИФИКАЦИЯ]	-	
	[1.12 ЗАВОДСКАЯ НАСТРОЙКА]	FCS- (Заводская настройка)	
	[1.13 МЕНЮ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ]	USr- (Меню пользователя)	
Назначение только одной функции для каждого входа		Назначение только одной функции для каждого входа	
	[1.4 ПРИВОД]	drC- (Привод)	СТАНДАРТНЫЙ Std (заводская настройка)
	[1.5 ВХОДЫ-ВЫХОДЫ]	I-O- (Входы-выходы)	
	[1.6 УПРАВЛЕНИЕ ЭП]	CtL- (Управление ЭП)	
	[1.7 ПРИКЛАДНЫЕ ФУНКЦИИ]	FUn- (Прикладные функции)	
	[1.8 УПРАВЛЕНИЕ ПРИ НЕИСПРАВНОСТЯХ]	FLt- (Управление при неисправностях)	РАСШИРЕННЫЙ AdU
	[1.9 КОММУНИКАЦИЯ]	COM- (Коммуникация)	
	[1.10 ДИАГНОСТИКА]	-	
	[1.14 КАРТА ПЛК] (1)	SPL- (Карта ПЛК) (1)	
[6 ЭКРАН КОНТРОЛЯ]		-	
Назначение только одной функции для каждого входа		Назначение только одной функции для каждого входа	
[7 КОНФИГУРАЦИЯ ОТОБРАЖЕНИЯ]		-	ЭКСПЕРТНЫЙ EPr
Назначение нескольких функций для каждого входа		Назначение нескольких функций для каждого входа	
Экспертные параметры		Экспертные параметры	
Назначение нескольких функций для каждого входа		Назначение нескольких функций для каждого входа	

(1) Доступно при наличии карты ПЛК.

Канал задания для режимов [Совместное] (SIM), [Раздельное] (SEP) и [Профиль I/O] (IO), несконфигурированный ПИД-регулятор



Канал задания для режимов [Совместное] (SIM), [Раздельное] (SEP) и [Профиль I/O] (IO), сконфигурированный ПИД-регулятор с заданиями с клеммника

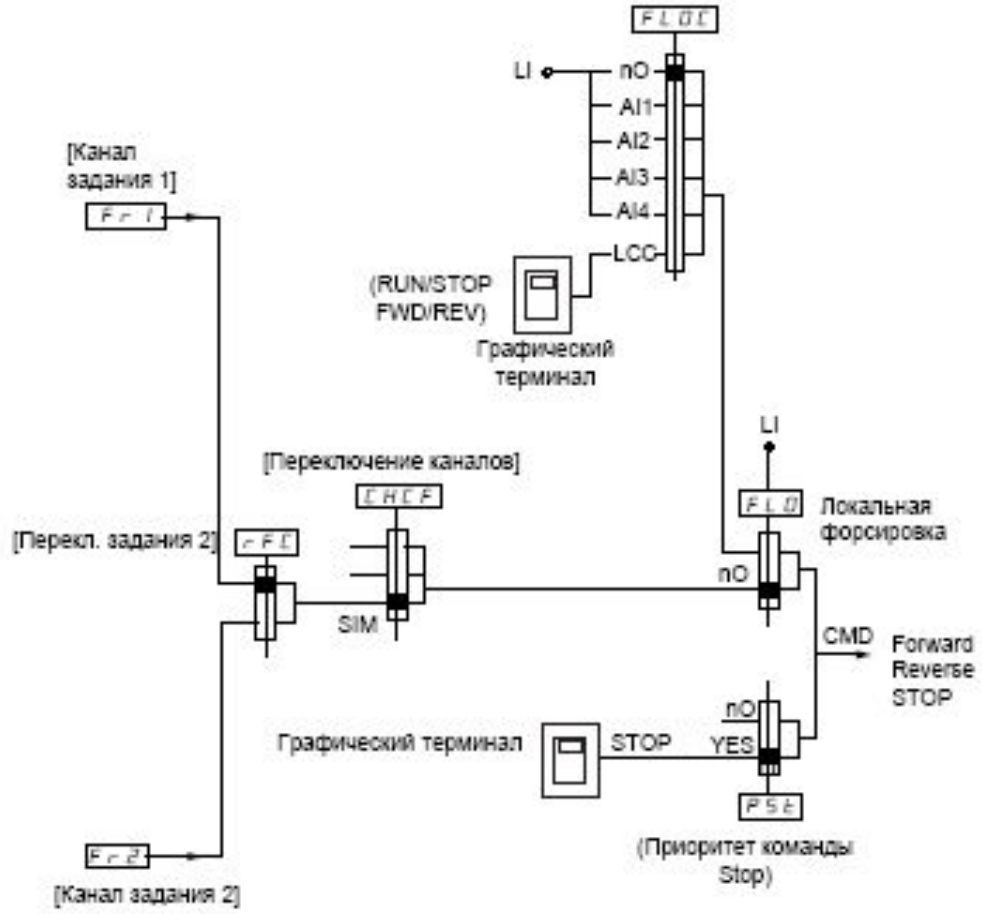


Канал задания для профиля [Совместное] (SIM)

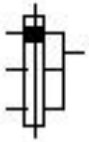
Совместное задание и управление

Канал управления определяется каналом задания. Параметры Fr1, Fr2, rFC, FLO и FLOC являются общими для задания и управления.

Например: если задание Fr1 = AI1 (аналоговый вход клеммника), то управление задается с помощью LI (дискретного входа клеммника).



Обозначение:



Черный квадрат соответствует заводской настройке

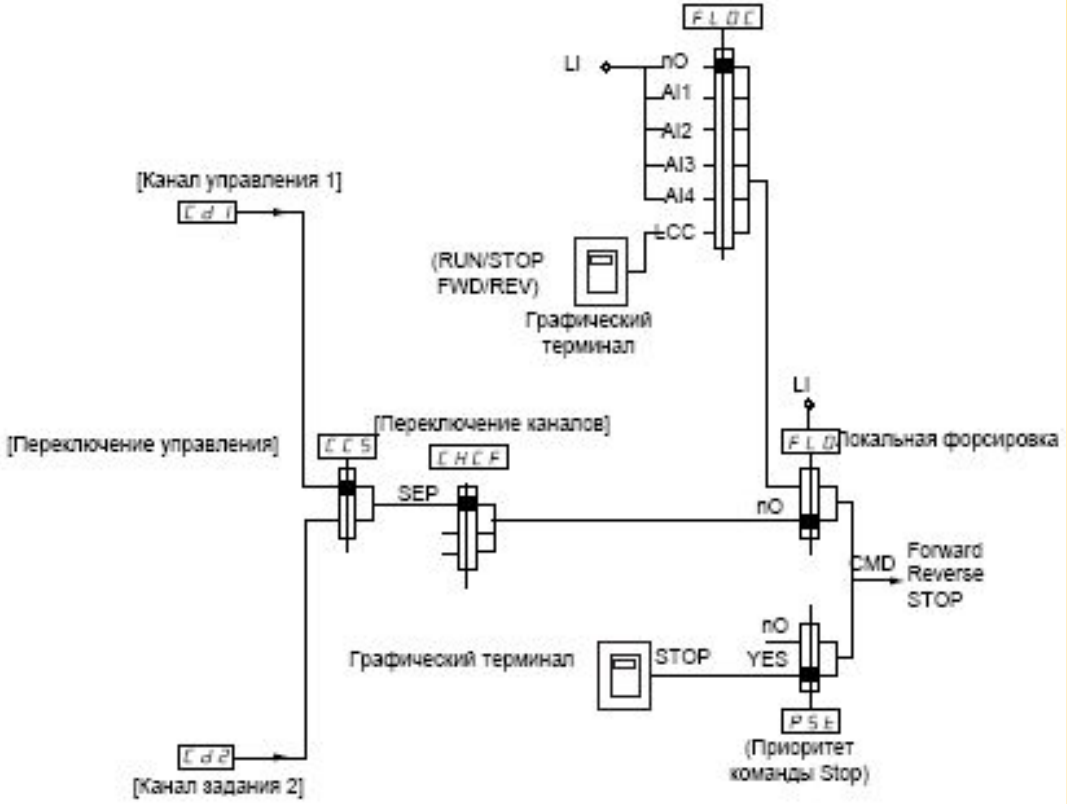
Канал задания для профиля [Раздельное] (SEP)

Раздельное задание и управление

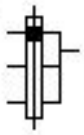
Параметры FLO и FLOC являются общими для задания и управления.

Например: если задание при локальной форсировке поступает на AI1 (аналоговый вход клеммника), то управление при локальной форсировке задается с помощью LI (дискретного входа клеммника).

Каналы управления Cd1 и Cd2 не зависят от каналов задания Fr1, Fr1b и Fr2.



Обозначение:



Черный квадрат соответствует заводской настройке, за исключением параметра [Переключение каналов].

Команды

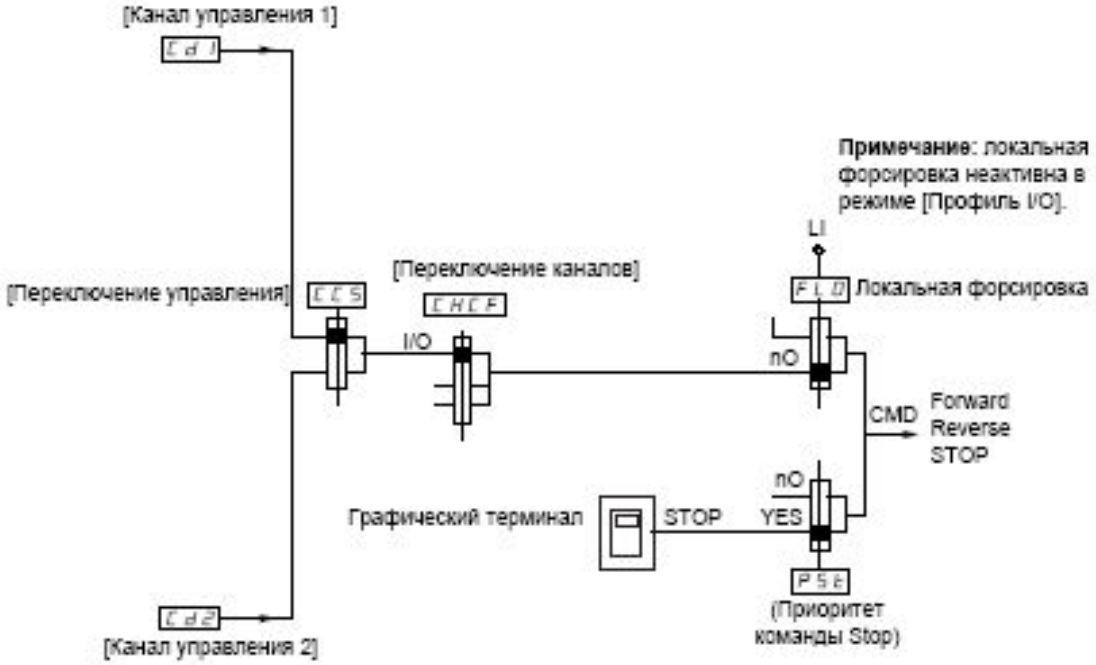
Cd1, Cd2:

- Клеммники, графический терминал, встроенный Modbus, встроенный CANopen, коммуникационная карта, карта ПЛК

Канал задания для профиля [Профиль I/O] (IO)

Раздельное задание и управление, как в режиме [Раздельное] (SEP)

Каналы управления Cd1 и Cd2 не зависят от каналов задания Fr1, Fr1b и Fr2.



Обозначение:

Черный квадрат соответствует заводской настройке, за исключением параметра [Переключение каналов]

Команды:

Cd1, Cd2:

- Клеммники, графический терминал, встроенный Modbus, встроенный CANopen, коммуникационная карта, карта ПЛК

Три рішення для створення проблемно-орієнтованих електроприводів:

- Застосування макро-конфігурацій (ATV71) або спеціальних функцій (ATV31, ATV71)
- Застосування вільно програмованої плати (ATV71) або спеціальних прикладних плат (,ATV71,ATV61)
- Створення проблемно-орієнтованого електропривода (ATV61, ATV21)

Застосування макро-конфігурацій (ATV71)

- Пуск/стоп (заводське налаштування)
- Транспортування
- Загальне застосування
- Підйомно-транспортні механізми
- ПІД-регулятор
- Комунікація
- Ведучий/ведений

Проблемно-орієнтований електропривод ATV61

- Орієнтований на застосування для механізмів з вентиляторною характеристикою
- ЗАБЕЗПЕЧУЄ:

  - ПІД-регулювання технологічного параметра

  - режим енергозбереження

  - Режим підхоплення на ходу,

  -адаптивне струмове обмеження у функції швидкості,

  -підрахунок годин роботи та спожитої електроенергії , тощо

Проблема електромагнітної сумісності ПЧ

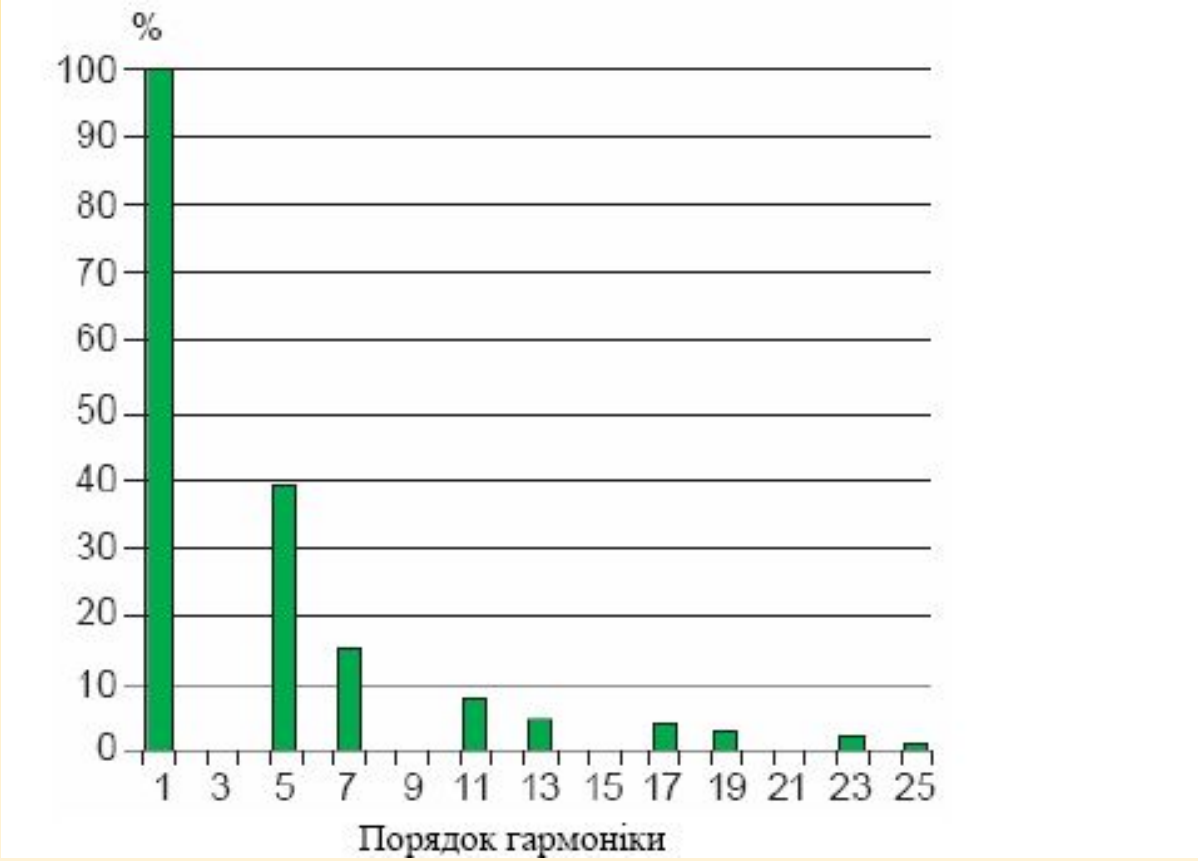
- Поняття про ЕМС
- Характеристика електромагнітних завад
- Вплив ПЧ на мережу
- Вплив ПЧ на двигун (перенапруги та градієнт *dU/dt*)

Поняття про ЕМС

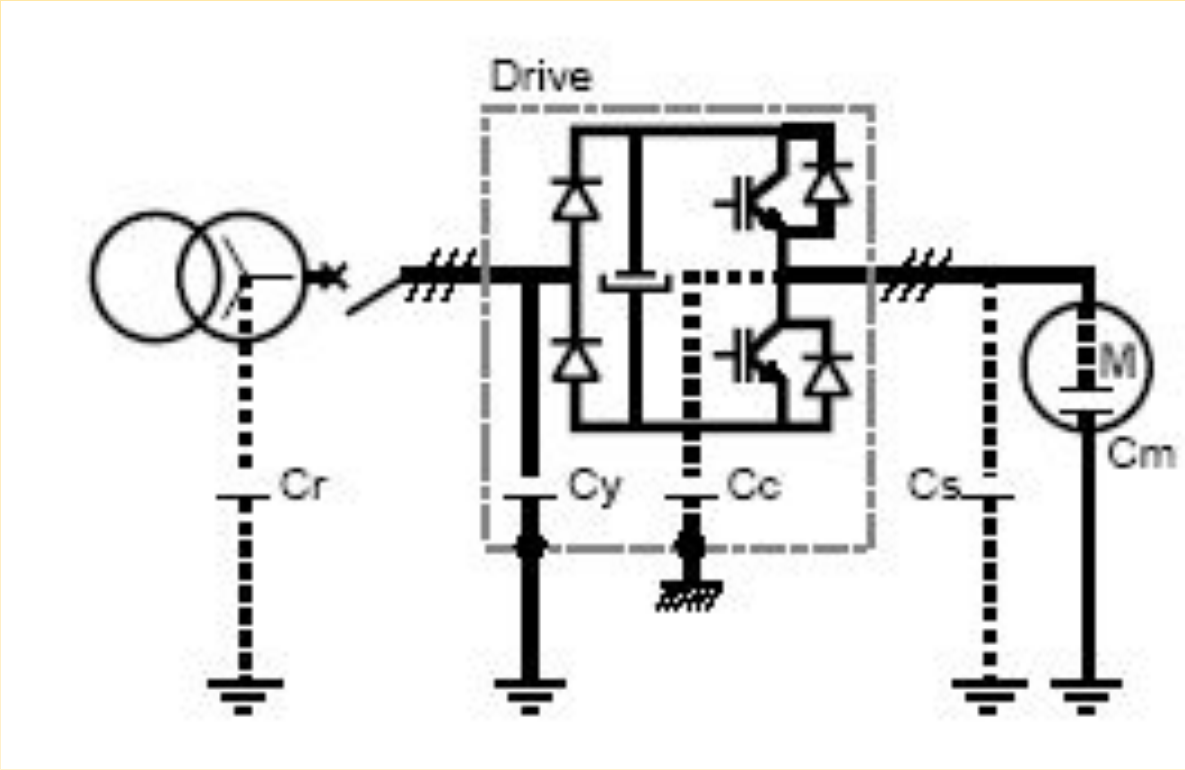
ЕМС –це можливість використання пристрою чи системи в електромагнітному середовищі без створення недопустимых для оточення чи іншого пристрою електромагнітних завад.

Вплив ПЧ на мережу

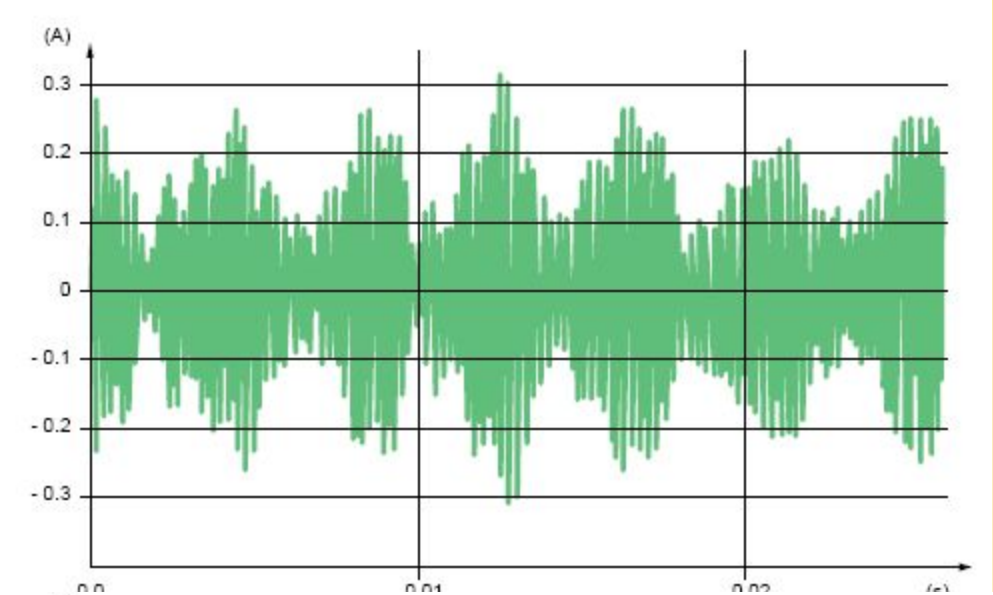
Спектральний склад гармонік струму

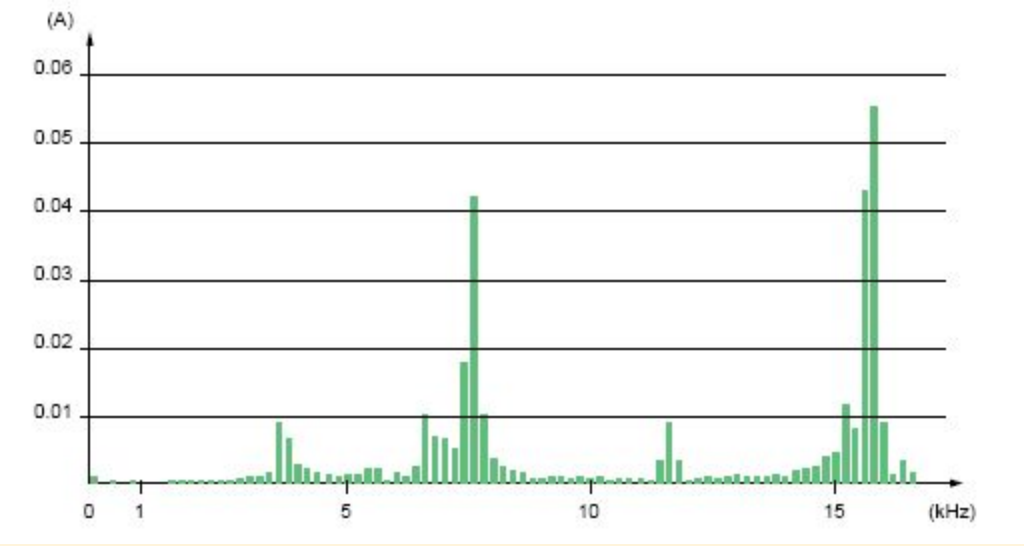


Емністний струм витоку



Емністний струм витоку



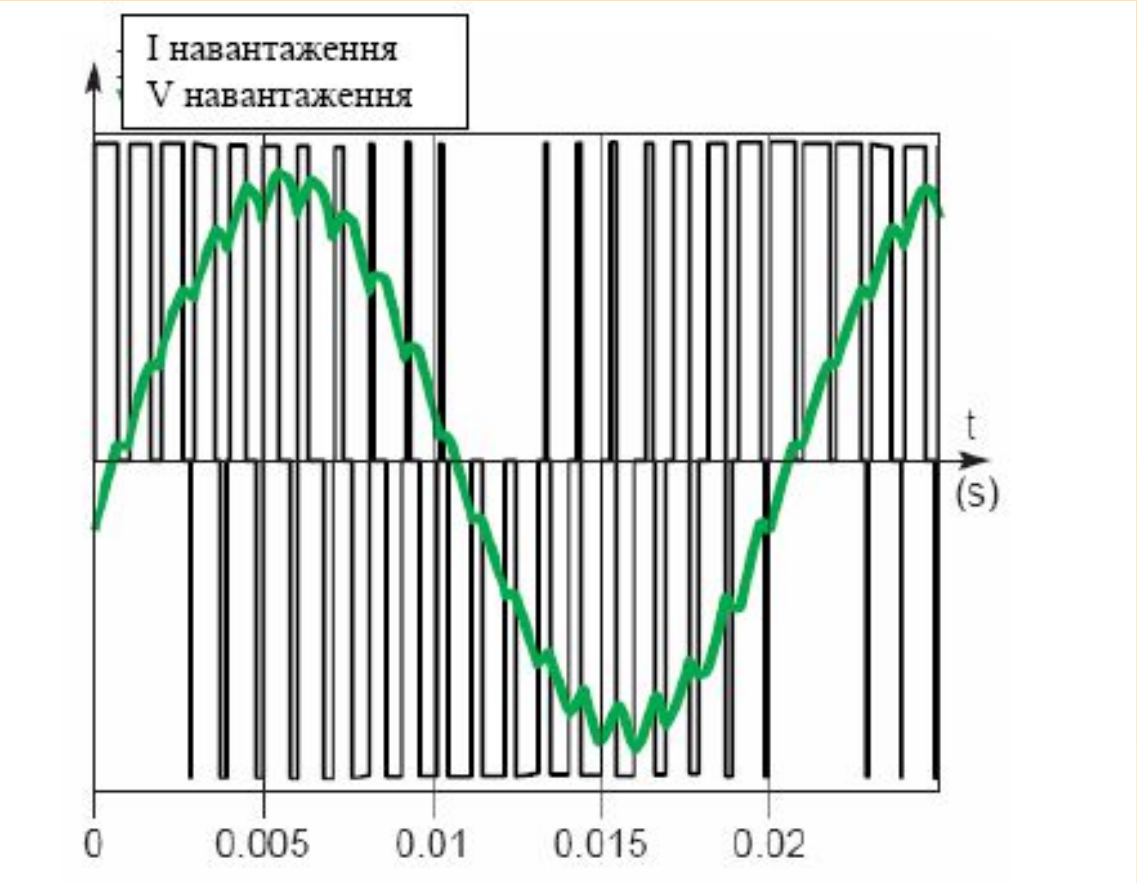


Засоби зменшення впливу ПЧ на мережу

- Використання мережного дроселя
- Використання дроселя постійного струму
- Використання додаткового вхідного фільтра радіочастот

Вплив ПЧ на двигун

- Проблема градієнту dU/dt
- Проблема довгого кабелю



Вихідні напруга та струм ПЧ

Наслідки такої вихідної напруги ПЧ:

- Виникнення хвильових процесів у кабелі та явища накладання падаючої та відбитої хвилі- результат: перенапруга на обмотці двигуна
- Круті фронти імпульсів напруги (dU/dt) викликають нерівномірний розподіл напруги між витками обмотки двигуна

Засоби для зменшення впливу ПЧ на двигун

- Використання дроселя двигуна
- Використання вихідного фільтра (у тому числі т.з. синусного фільтра)
- Активізація у програмі ПЧ спеціальної функції (ATV71)

Проблема захисту ПЧ

- Види захисту
- Поняття про координацію комутаційної апаратури

Мета координації

- Захистити обслуговуючий персонал та установку при виникненні будь-яких аварійних струмів (перевантаження або струми к.з.)
- Зменшити витрати на уведення в експлуатацію після аварії та мінімізувати час на заміну та вартість апаратури.

Координація захисту

Ідея координації у стандарті МЕК 947

- **Пріоритет захисту персоналу та обладнання**
  - *Не повинно бути ніяких проявів ззовні шафи*
  - *Ніякої небезпеки пожежі*
- **Приймати до уваги обслуговування обладнання**
  - *Обмежити небезпеку пошкодження апаратури силового кола*
- **Скорочення часу простою**

  Неперервність стану працездатності для покращення продуктивності

МЕК 947: 3 рівня координації

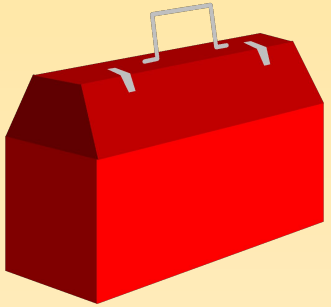
- Координація типу 1 (МЕК 947-4-1)
- Координація типу 2 (МЕК 947-4-1)
- Координація повна (МЕК 947- 6-2)

Координація силового кола двигуна залежить головним чином від:

- електричного середовища
-- вибору апаратури

Координація типу 1 (МЕК 947-4-1)

У випадку к.з.



- Ніякої небезпеки для персоналу та установки
- Контактор та/або реле можуть бути пошкоджені
- Перед повторним пуском потрібно замінити апаратуру

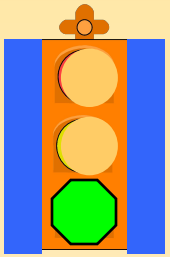
Координація типу 2
МЕК 947-4-1

У випадку к.з.

- Ніякої небезпеки для персоналу та обладнання.
- Не допускається ніякого пошкодження апаратури.
- Ризик зварювання контактів допускається. Контакти можуть бути легко роз’єднанні за допомогою інструменту (викруткою).
- Ніяких повторних налагоджень не потрібно робити.
- Електрична ізоляція повинна зберігатися після аварії. Коло повинна бути готовим для повторного вмикання в роботу.

Повна координація
(МЕК 947-6-2)

У випадку к.з.



- Ніякої небезпеки для персоналу та обладнанн
- Ніякого пошкодження пускача (контактора), не допускається ніякого зварювання контактів, електрична ізоляція не повинна бути порушена
- Негайний повторний пуск є можливим без інспектування апаратури