

Базові знання VFD

Січень 2020 року

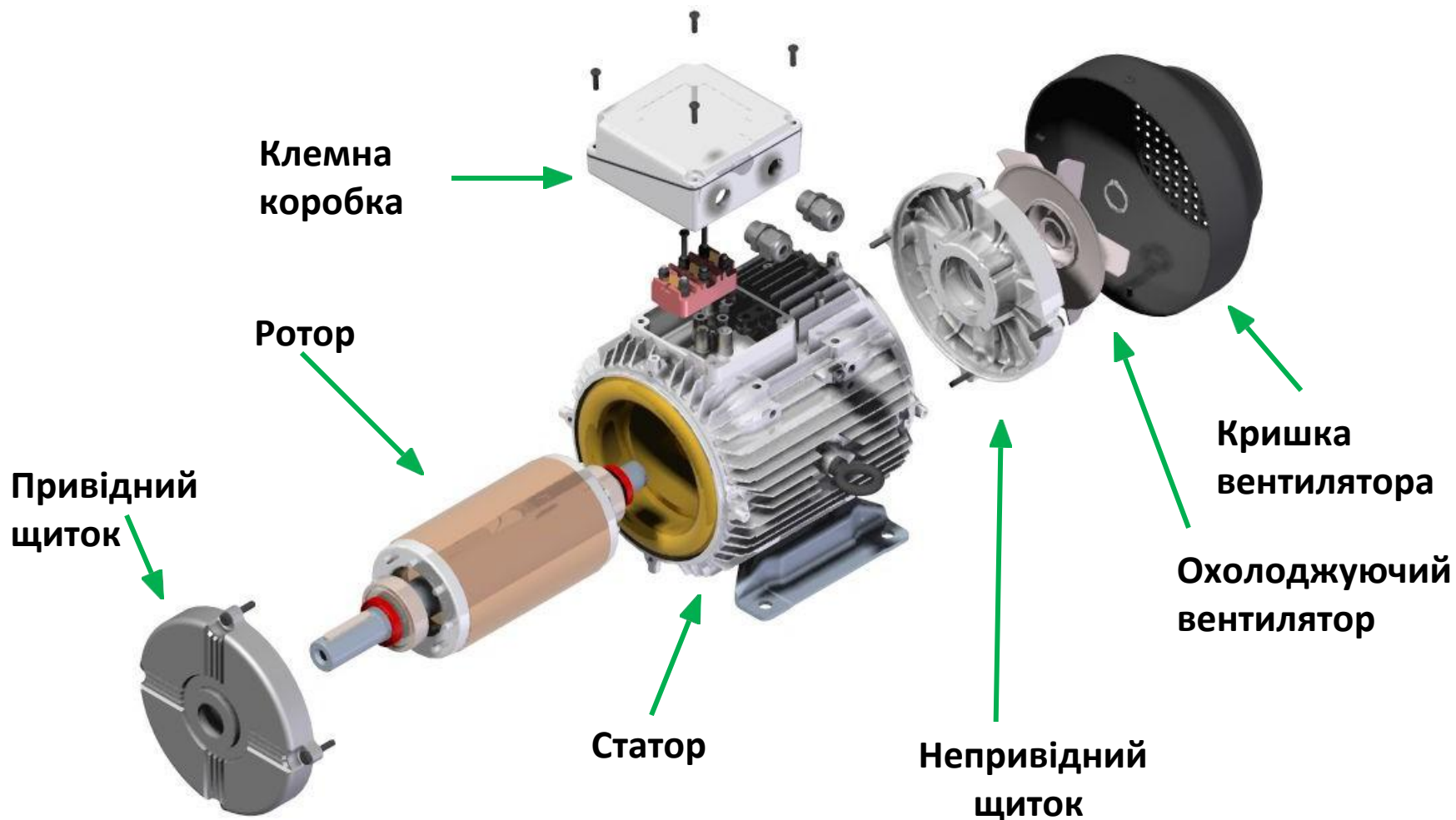


Основна функція приводу змінної швидкості



- Трифазні асинхронні двигуни - двигун змінного струму
- З'єднання зірка/трикутник
- Крутний момент і потужність
- Регульований привод VSD
- Принципи керування приводом
- Криві швидкості крутного моменту
- Запуск двигуна змінного струму
- Почніть із приводу із змінною швидкістю
- Електричне гальмування/ 2 і 4 квадрантна робота
- Активний інтерфейс
- Енергозбереження

Трифазні асинхронні двигуни - двигун змінного струму

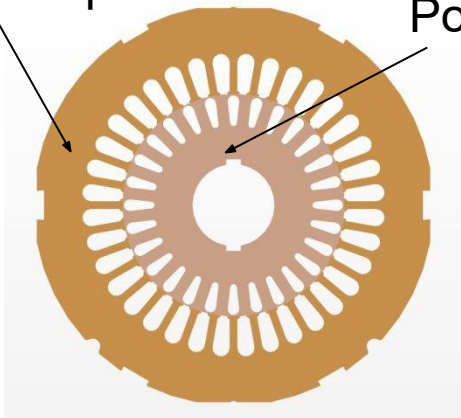




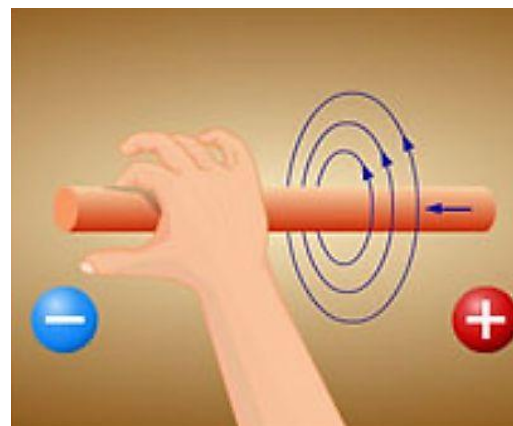
Створення обертового поля в статорі

Статор

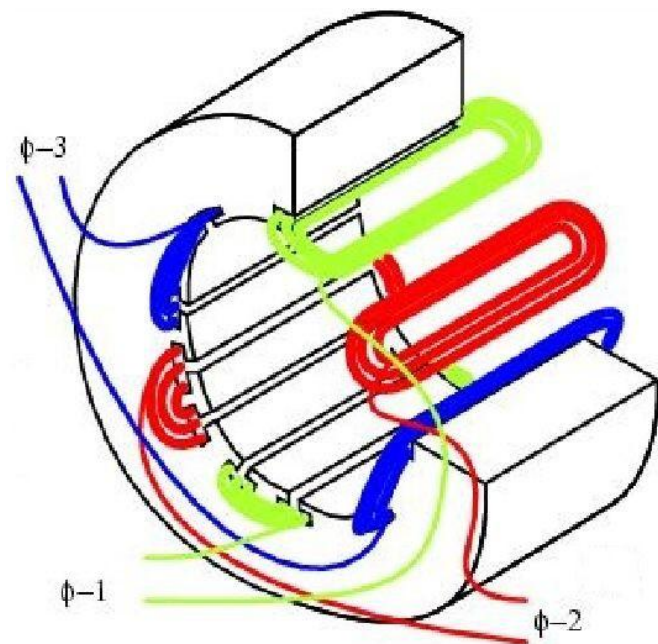
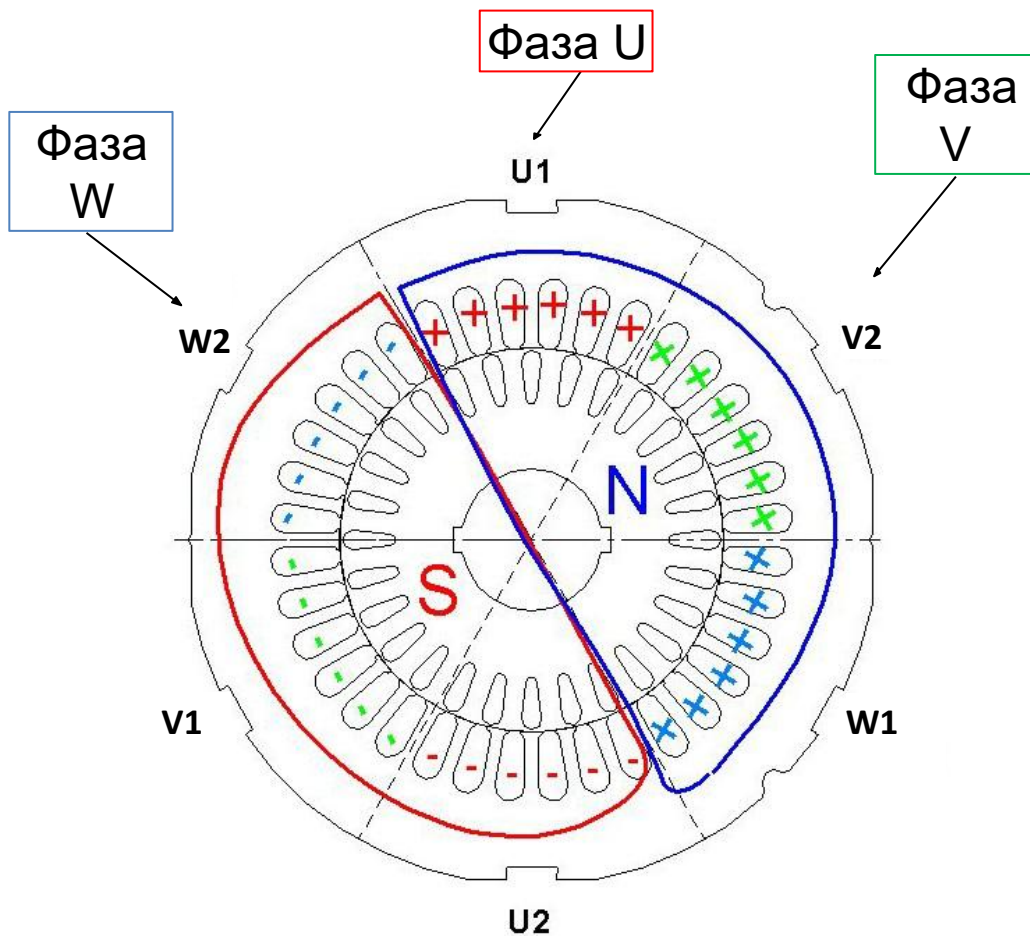
Ротор



Правило правої руки

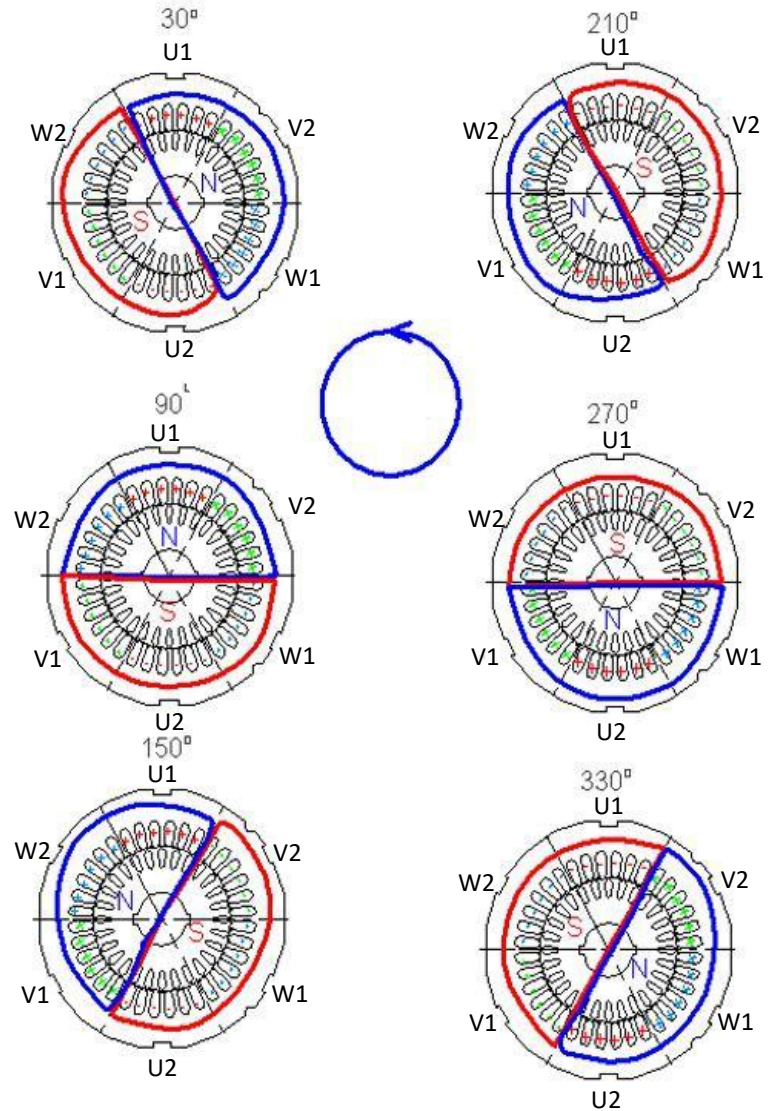
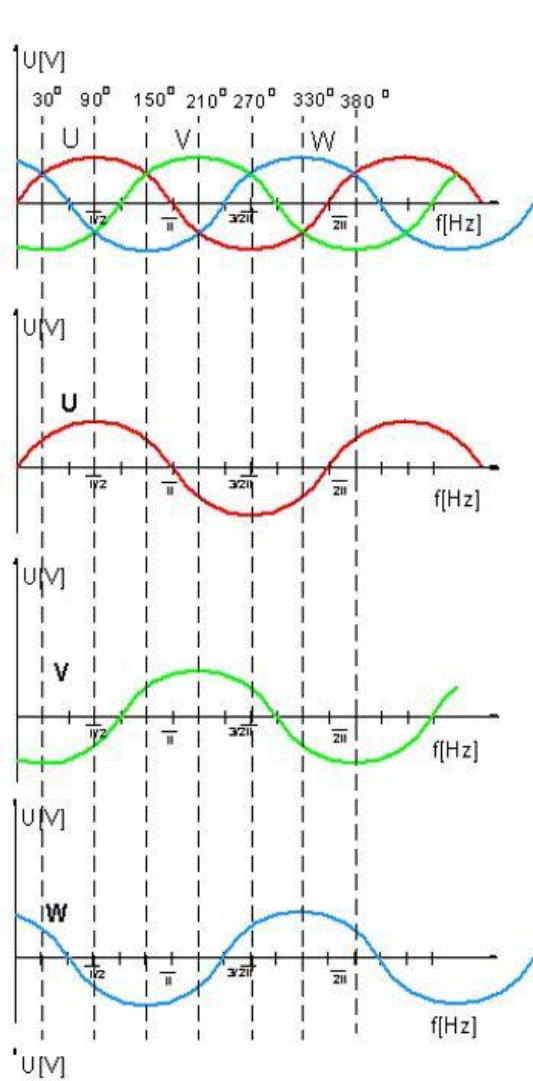


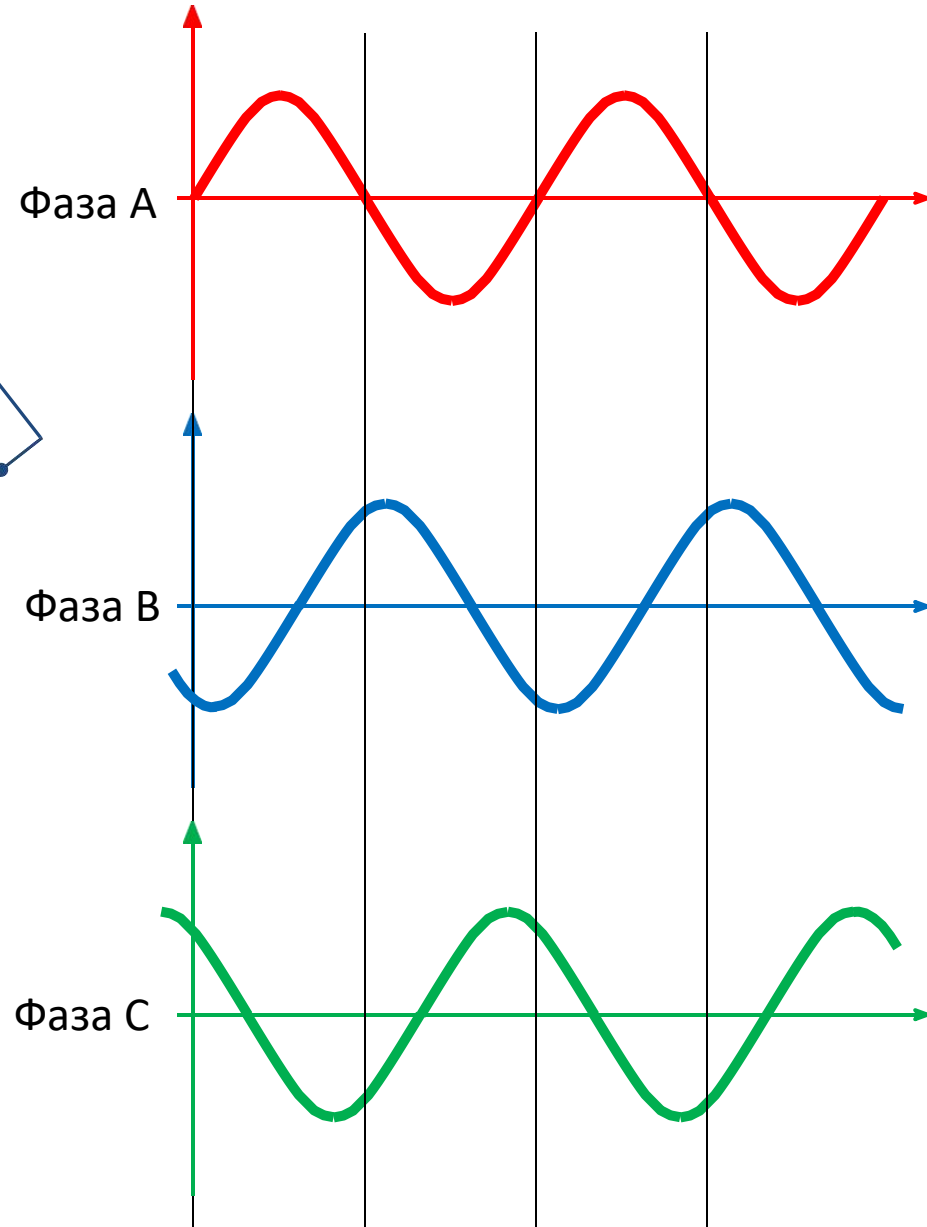
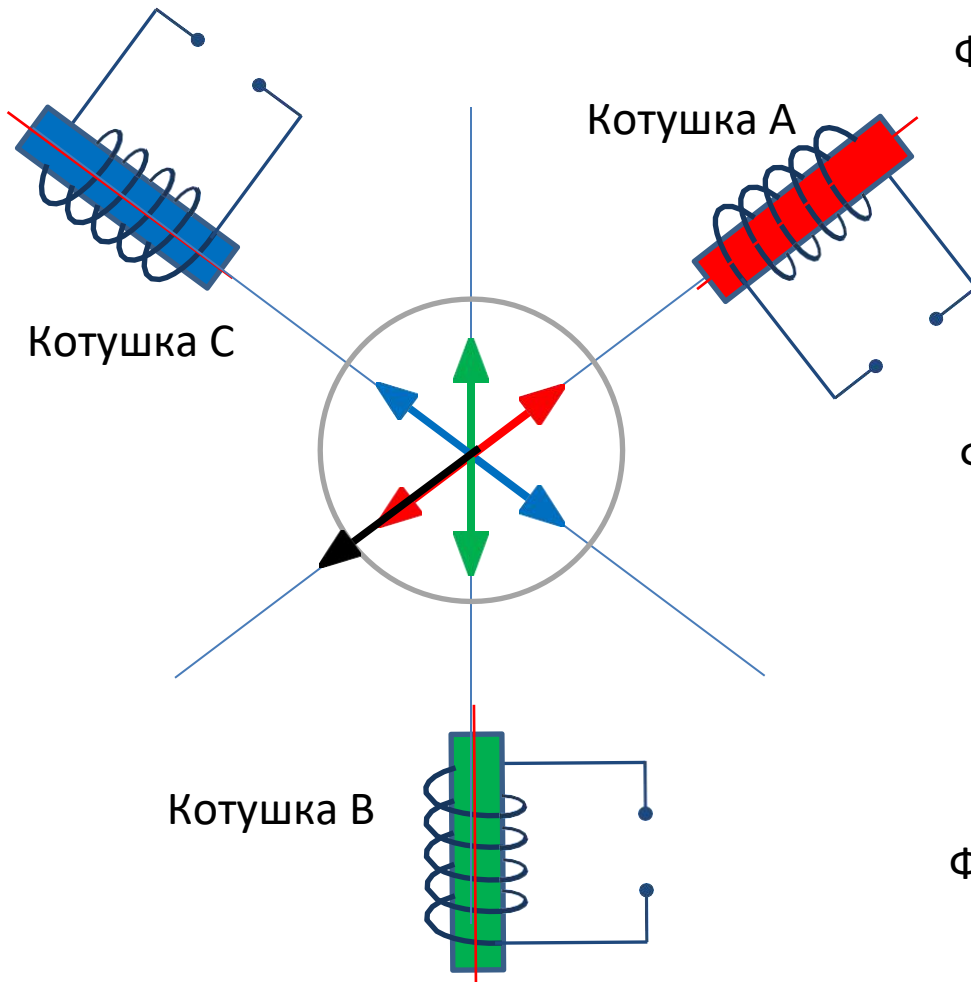
Створення обертового поля в статорі



- 2 полюси (1 пара полюсів)
- Пакет статора на 36 пазів
- 12 слотів на фазу
- 6 слотів на полюс на фазу

Створення обертового поля в статорі



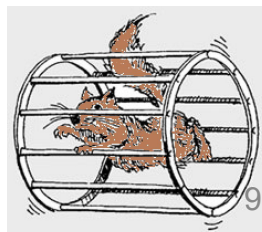
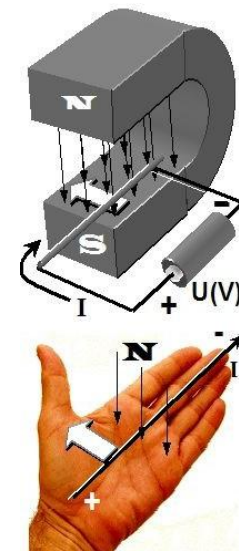
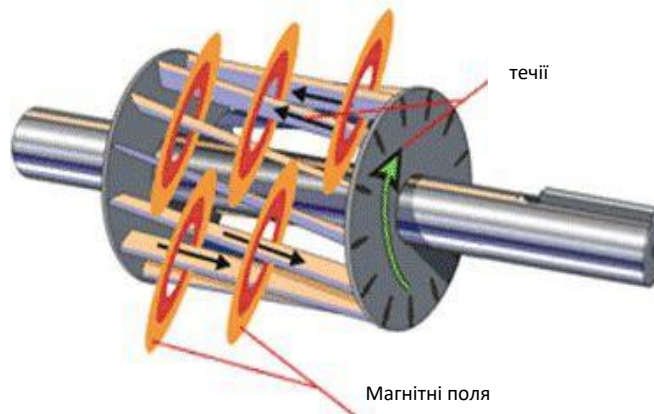
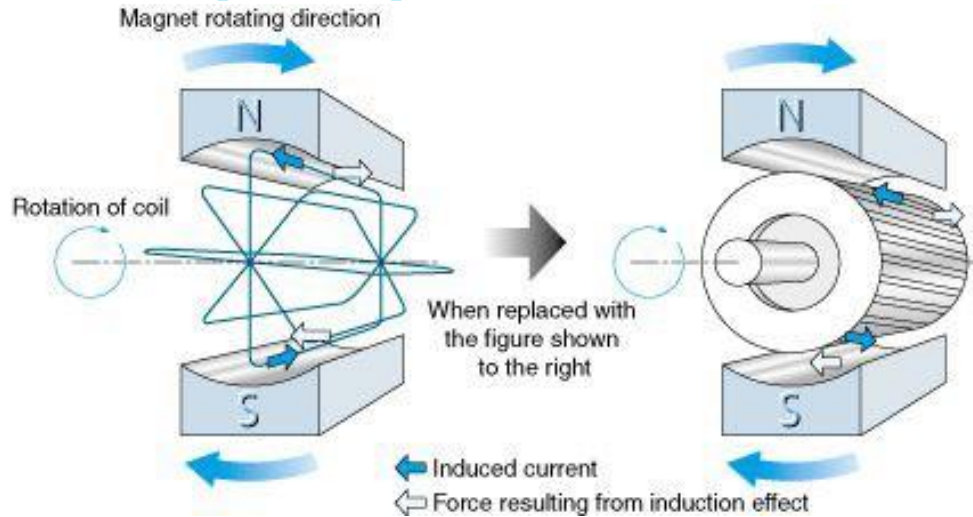


Обертання ротора



- Трифазна напруга частотою 50 Гц подається на статор, це створює магнітне обертове поле (правило лівої руки)
- Роторні стрижні прорізуються через це обертове поле та генерують індуктивну напругу.
- Стержні ротора замкнуті накоротко, тому в них буде протікати струм.
- Рухомі провідники зі струмом у змінному магнітному полі створюють механічну силу (силу Лоренца, правило лівої руки), яка повертає ротор і створює йому крутний момент.
- Якщо ротор рухається точно в одній лінії з обертовим полем, то стрижні не перерізають лінії магнітного поля, тому немає сили та крутного моменту. Ось чому це асинхронний двигун

(У Великій Британії його називають двигуном «білячої клітини»)





Важливо:

Зауважте, що напрям залежить від послідовності напруги живлення L1, L2, L3, підключені до U, V, W двигуна

Напрямок обертового поля завжди розглядається з боку приводного кінця. (обличчям до валу)

Якщо напруга живлення L1, L2, L3 підключена до U, V, W, напрямок буде за годинниковою стрілкою

L1 > U	}	ЗА ГОДИННИКОВОЮ СТРІЛКОЮ
L2 > V		
L3 > W		

L2 > U	}	ПРОТИ ГОДИННИКОВОЇ СТРІЛКИ
L1 > V		
L3 > W		



Швидкість двигуна змінного струму та пари полюсів

Кількість полюсів задає синхронну швидкість:

ПРИКЛАД: 4 полюси (2 північні та 2 південні) = 2 пари полюсів

$$n_s = \frac{f \times 60}{p} \quad n_s = \frac{50 \times 60}{2} = 1500 \text{ об / хв}$$

n_s = швидкість обертового магнітного поля (об/хв)

f = частота (мережі) (Гц)

60 = коефіцієнт перерахунку з сек. до хв.

p = кількість пар полюсів

50 Гц	полюси	2	4	6	8	10	12
	n (об/хв)	3000	1500	1000	750	600	500
	n ротора (об/хв)	2920	1460	960	720	580	490

60 Гц	полюси	2	4	6	8	10	12
	n (об/хв)	3600	1800	1200	900	720	600
	n ротора (об/хв)	3520	1760	1160	870	700	590

- З обмотки всередині стандартного двигуна змінного струму можна з'єднати двома способами:
DELTA або STAR .
- (іноді двигуни побудовані з фіксованими з'єднаннями, це здебільшого **DELTA**)
- **напруги живлення** залежить, яка конфігурація буде використана.
- Найпоширеніші конфігурації :

Двигун 400/690 В > 3 кВт:

DELTA: мережева напруга = 400 В, фазна напруга = 400 В

STAR: мережева напруга = 690В, фазна напруга = 400В

Двигун 230/400 В < 3 кВт:

DELTA: мережева напруга = 230 В, фазна напруга = 230 В

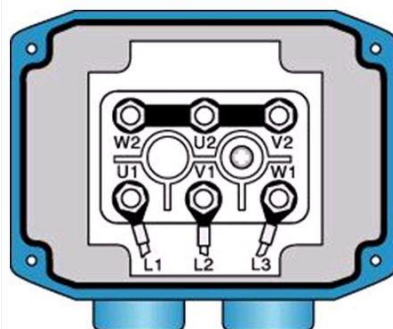
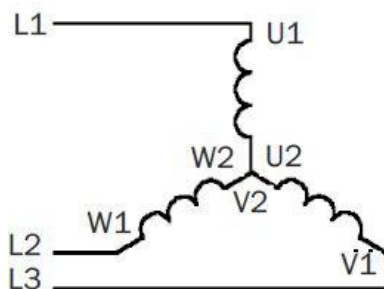
STAR: мережева напруга = 400В, фазна напруга = 230В

Струм у дельті = $1,73 (\sqrt{3})$ x струм у зірці.

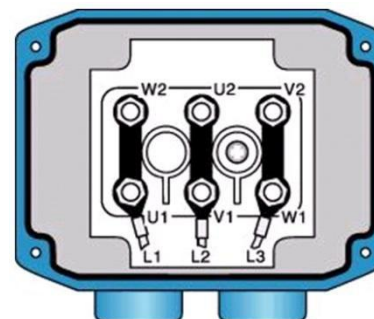
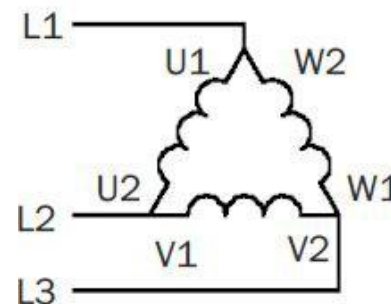
ATB МОТОР	
Тип 160 I	
3 ~ Mot.	Nr. 12345-88
Δ Y 400/690 V	29/17 A
S1 15 kW	cos φ 0,85
1430 U/min	50 Hz
iso.-kl. F	IP 54 t
IEC34-1/VDE 0530	

З'єднання ЗІРКА / ТРУКТУРНИК

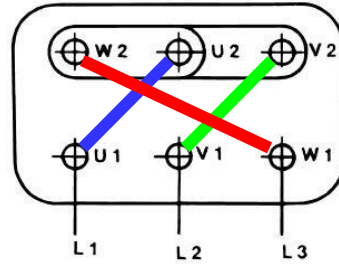
З'ЄДНАННЯ ЗІРКА



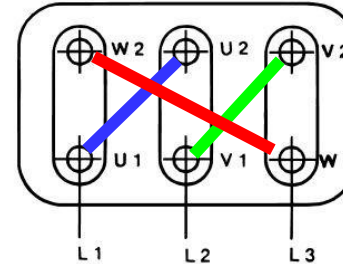
ДЕЛЬТА З'ЄДНАННЯ



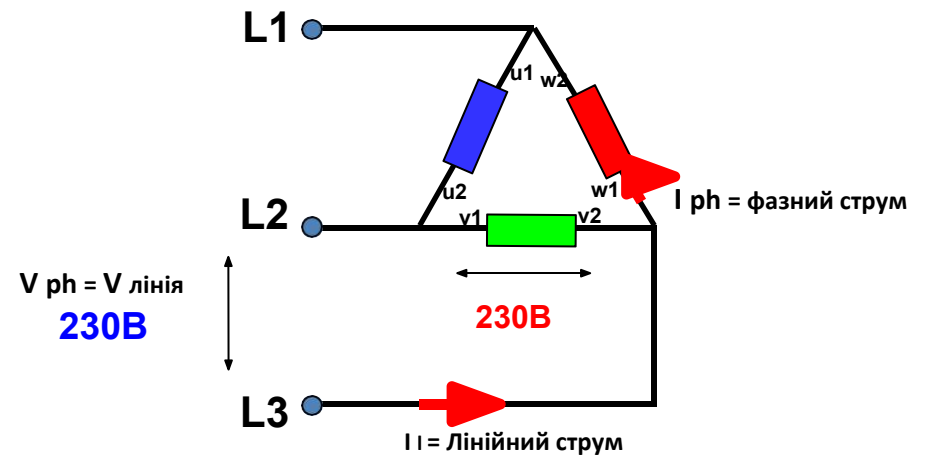
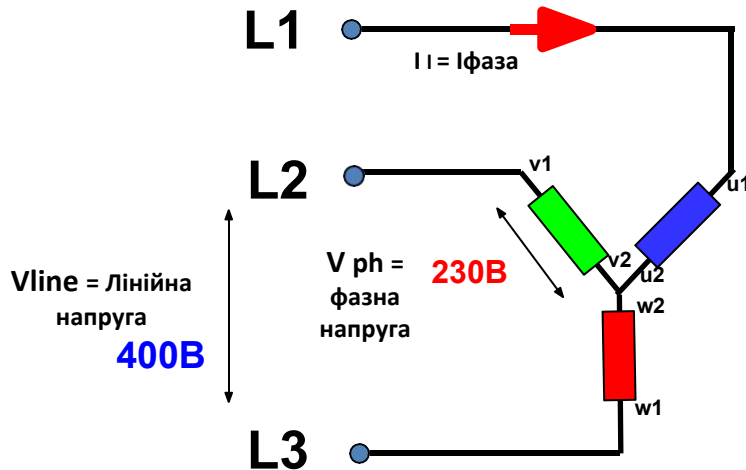
ЗІРКА



ДЕЛЬТА



На заводській табличці: **230 / 400 В Δ / Y**



З'ЄДНАННЯ ЗІРКА:

$$V_{\text{лінія}} = V_{\text{фаза}} \times \sqrt{3}$$

$$I_{\text{лінія}} = I_{\text{фаза}}$$

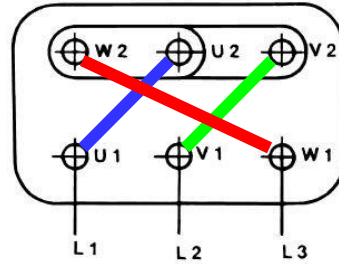
З'ЄДНАННЯ ДЕЛЬТА:

$$I_{\text{лінія}} = I_{\text{фаза}} \times \sqrt{3}$$

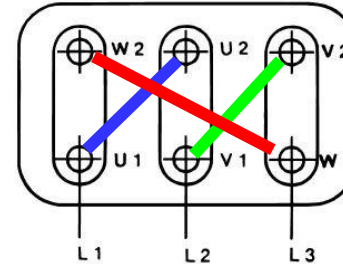
$$V_{\text{лінія}} = V_{\text{фаза}}$$

Порада: найнижча напруга – це завжди фазна напруга

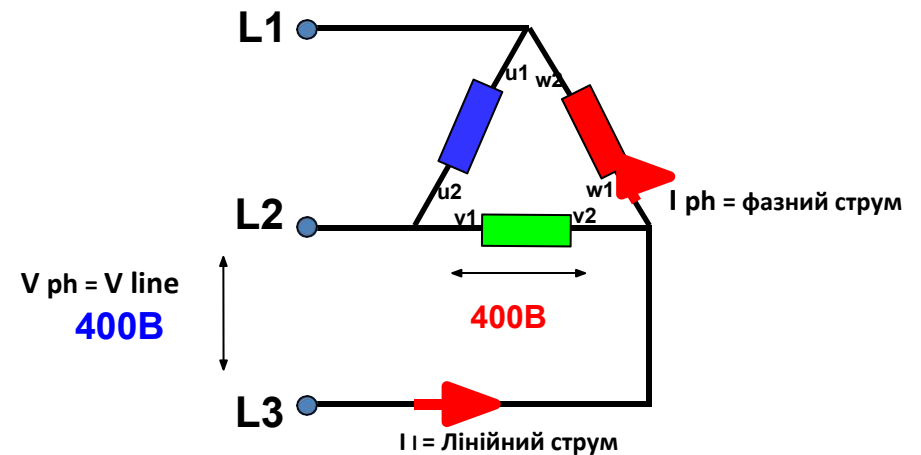
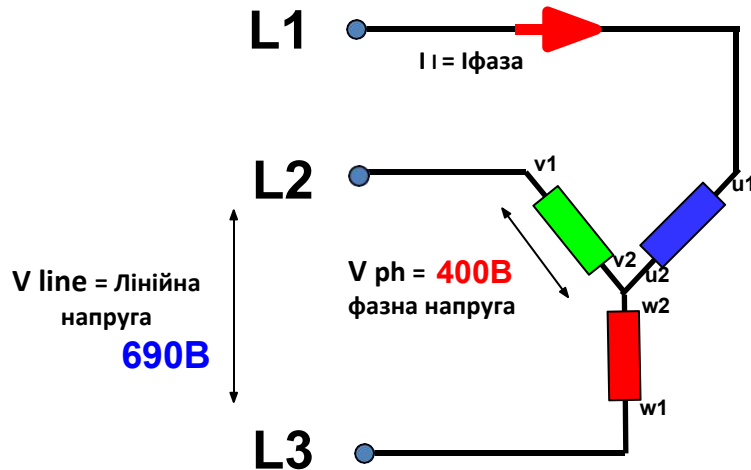
ЗІРКА



ДЕЛЬТА



На заводській табличці: **400 / 690 В** Δ / Y



З'ЄДНАННЯ ЗІРКА:

$$V_{\text{лінія}} = V_{\text{фаза}} \times \sqrt{3}$$

$$I_{\text{лінія}} = I_{\text{фаза}}$$

З'ЄДНАННЯ ДЕЛЬТА:

$$I_{\text{лінія}} = I_{\text{фаза}} \times \sqrt{3}$$

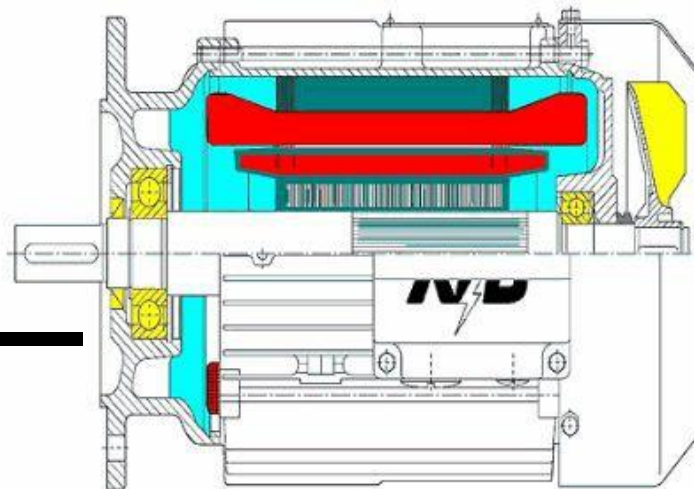
$$V_{\text{лінія}} = V_{\text{фаза}}$$

Порада: найнижча напруга – це завжди фазна напруга

Вхідна потужність **P1**



- Втрати міді
- Втрати заліза
- Втрати на тертя та вентилятор
- Інше



Вихідна потужність **P2**
(потужність на валу)



формула:

$$P1 = U \times I \times \sqrt{3} \times \cos \varphi$$

$$\square P1 = 400 \times 8,1 \times 1,73 \times 0,84 = \mathbf{4,71 \text{ кВт}}$$

$$P2 = U \times I \times \sqrt{3} \times \eta \times \cos \varphi$$

$$\square P2 = 400 \times 8,1 \times 1,73 \times 0,85 \times 0,84 = \mathbf{4 \text{ кВт}}$$

$$\text{ККД } \eta = \frac{P2 \text{ (кВт) механічна потужність (вал)}}{P1 \text{ (кВт) електрична потужність}}$$

Електроенергія:

Степінь (P) = $U \times I \times \sqrt{3} \times \cos \phi$

Цей приклад:

Потужність = $400 \times 29 \times 1,73 \times 0,85 = 17057 \text{ Вт}$

Потужність механічного вала = 15000 Вт

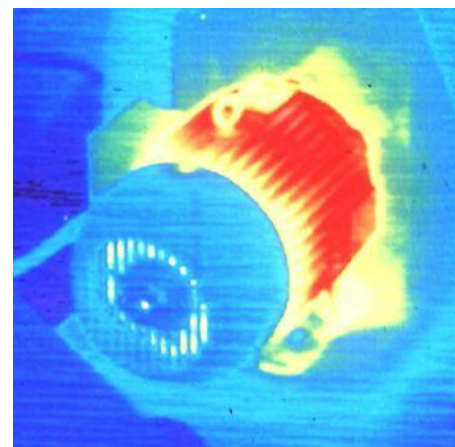
Отже: ККД цього двигуна:

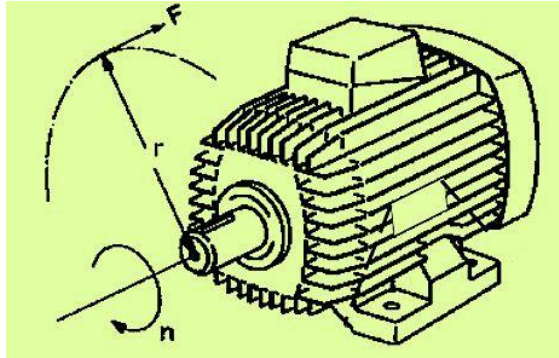
$$\eta = 15000 / 17057 \times 100\% = 87,94\%$$

Втрати в двигуні:

- Втрати міді в обмотках, струм виділяє тепло в обмотках
- Втрати ротора, струм ротора виробляє тепло в роторних стрижнях
- Втрати заліза через намагнічування заліза (100 разів на секунду!)
- Тертя в підшипниках
- Втрати через турбулентність повітря всередині двигуна та вентилятора двигуна

ДВИГУН	
Тип 160-3 МІННОГО ТОКУ	
3 ~ Mot.	Nr. 12345-88
Δ Y 400/690 V	29/17 A
S1 15 kW	cos φ 0,85
1430 U/min	50 Hz
Iso.-Kl. F	IP 54
IEC34-1/VDE 0530	





Крутний момент = Сила x Arms
 $T = F \times r$

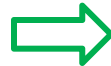
$$P = \omega \star T$$

with:

P = shaft power (W)

ω = angular speed (rad/s)

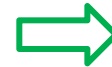
T = torque (Nm)



therefore:

$$P = \frac{2\pi \star n \star T}{60}$$

$$\frac{2\pi}{60} = \frac{1}{9.55}$$



ПОТУЖНІСТЬ:

$$P = \frac{T \star n}{9,55}$$

КРУТНИЙ МОМЕНТ:

$$T = \frac{9,55 \star P}{n}$$



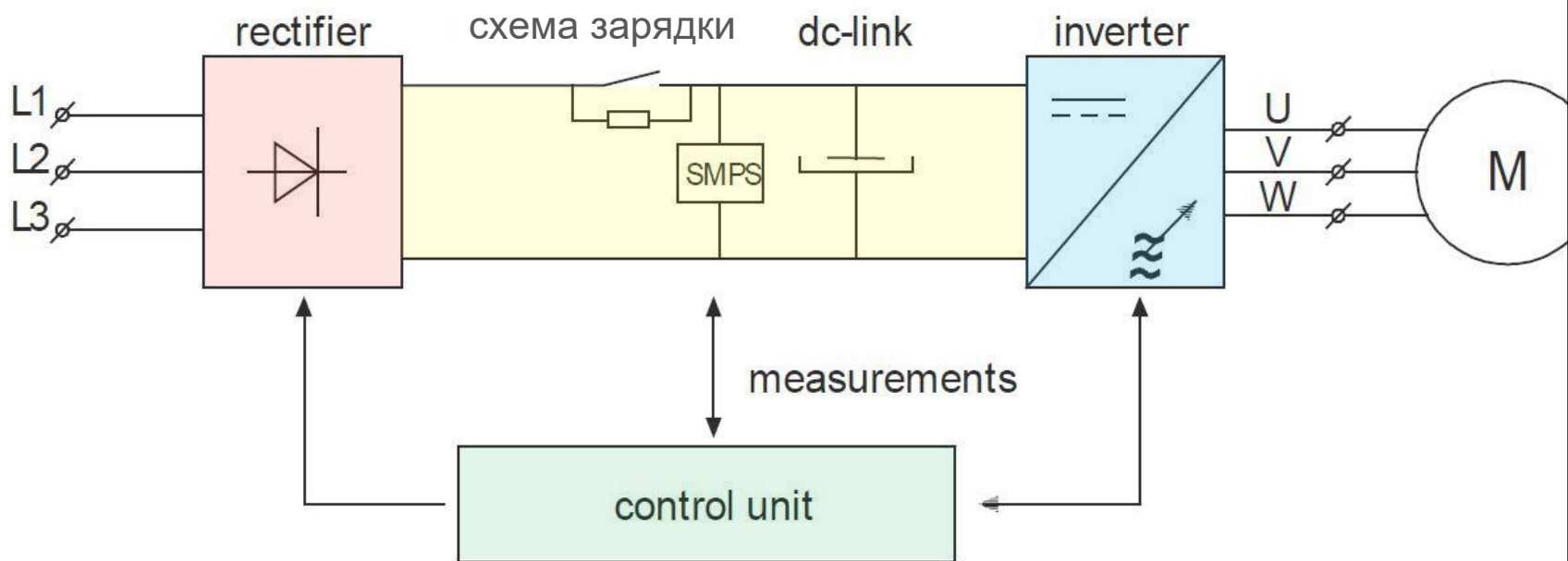
$$T = \frac{9,55 \star 15000}{1430}$$



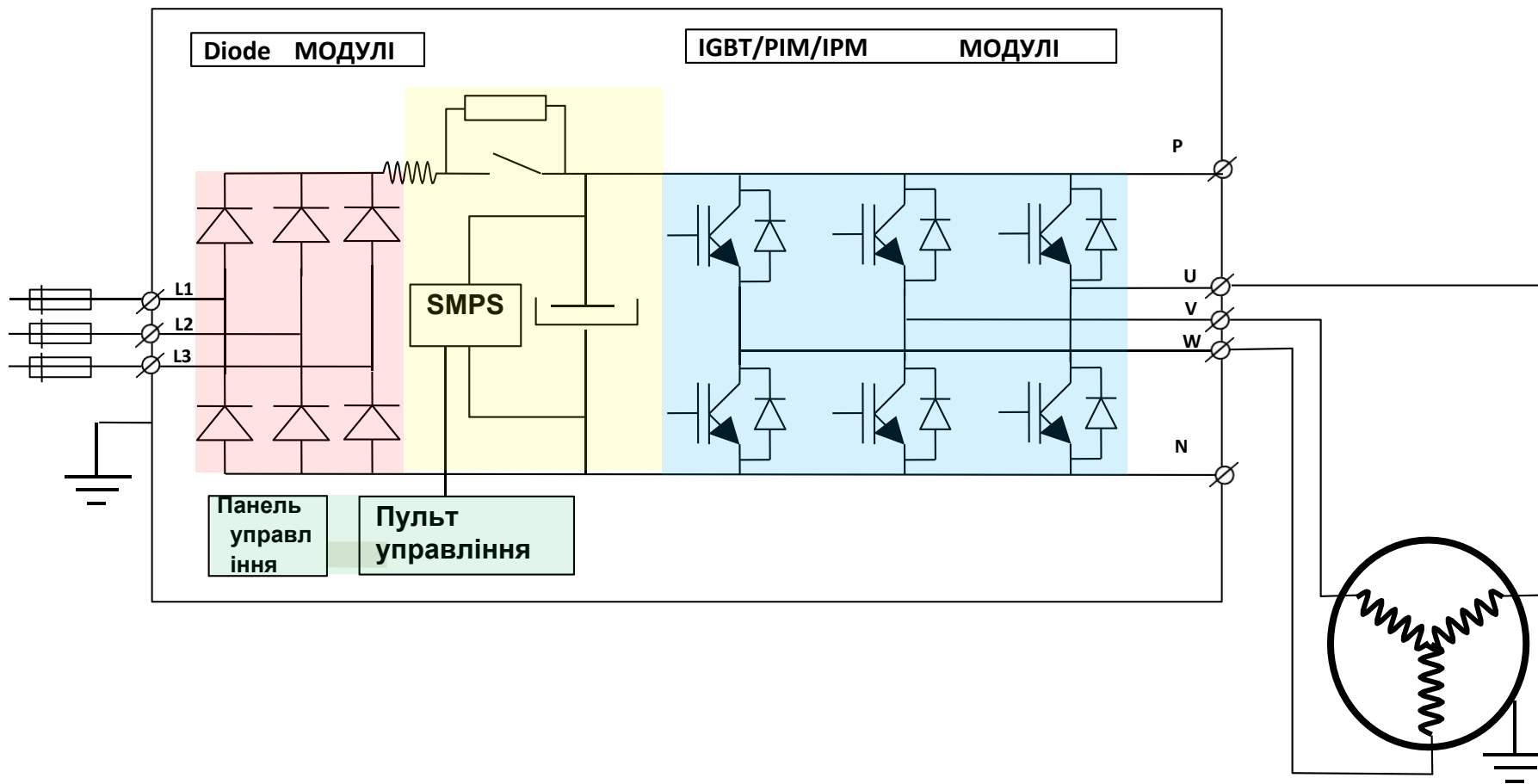
100,1 Нм

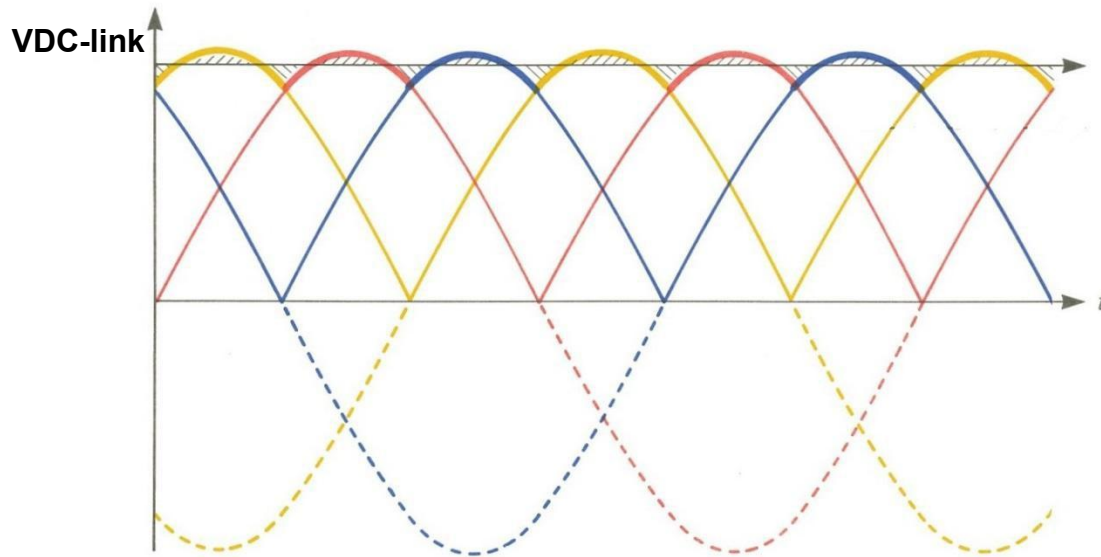
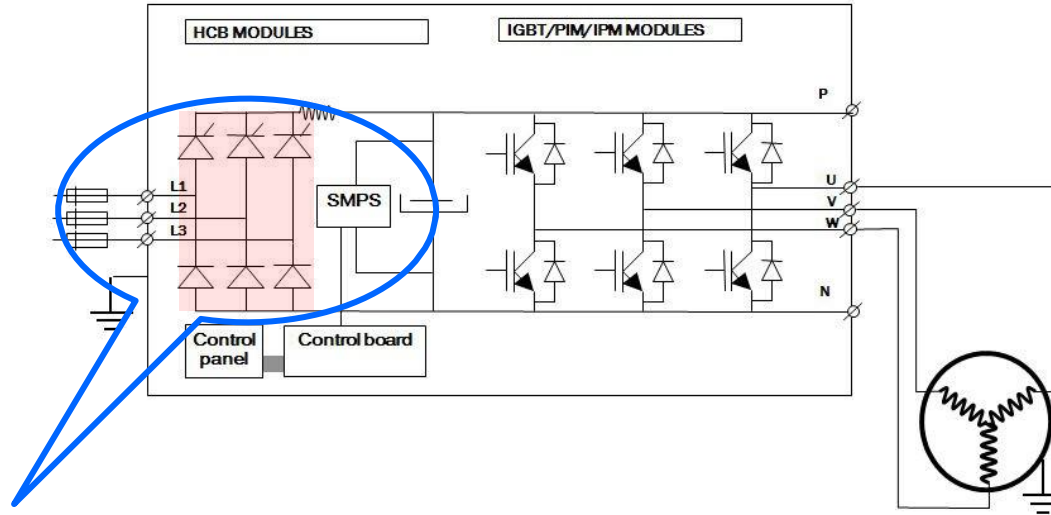
○ ДВИГУН ЗМІННОГО ТОКУ АТВ ○	
Тип 1601	
3 ~ Mot.	Nr. 12345-88
Δ Y 400/690 V	29/17 A
S1 15 kW	cos φ 0,85
1430 U/min	50 Hz
Is0.-Kl. F	IP 54
IEC34-1/VDE 0530	

Блок-схема



Принципова схема





Пікова напруга випрямляча
 $\approx \sqrt{2} * V_{RMS}$,
 отже, якщо вхідна напруга
 становить 400 В змінного струму:
VDC = 1,4 * 400 \approx 570VDC

Фактична напруга ланцюга
 постійного струму буде
 відрізнятися залежно від умов
 навантаження та використання
 котушки постійного струму та
 номіналу конденсатора.

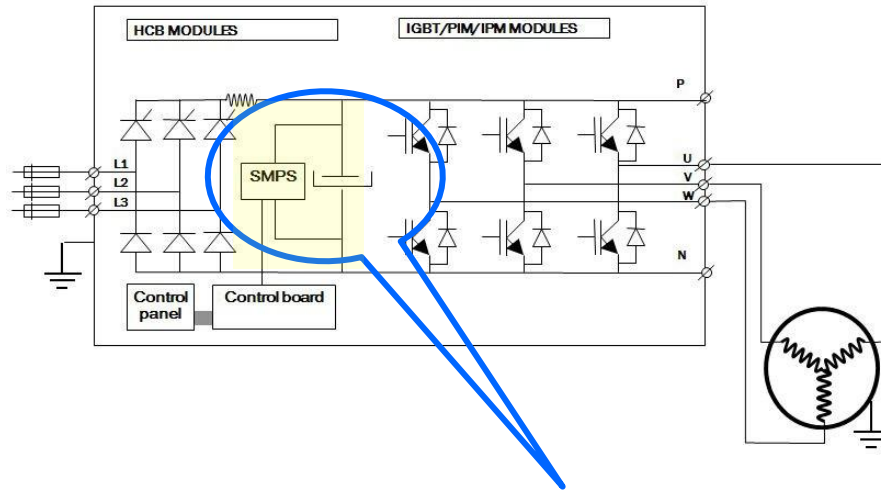
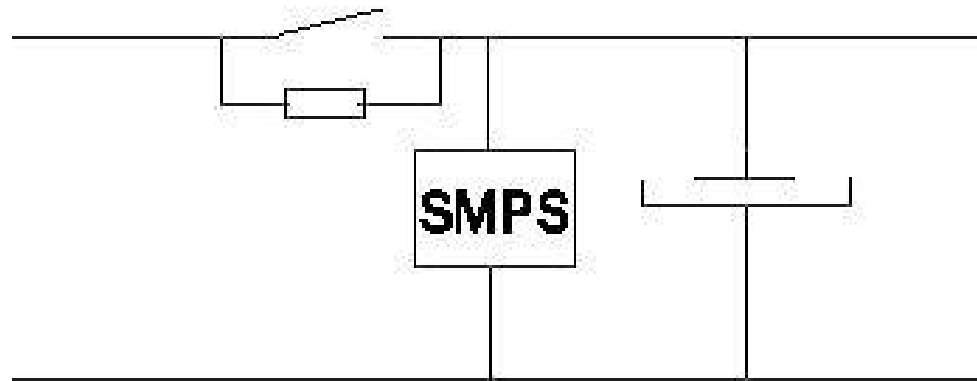
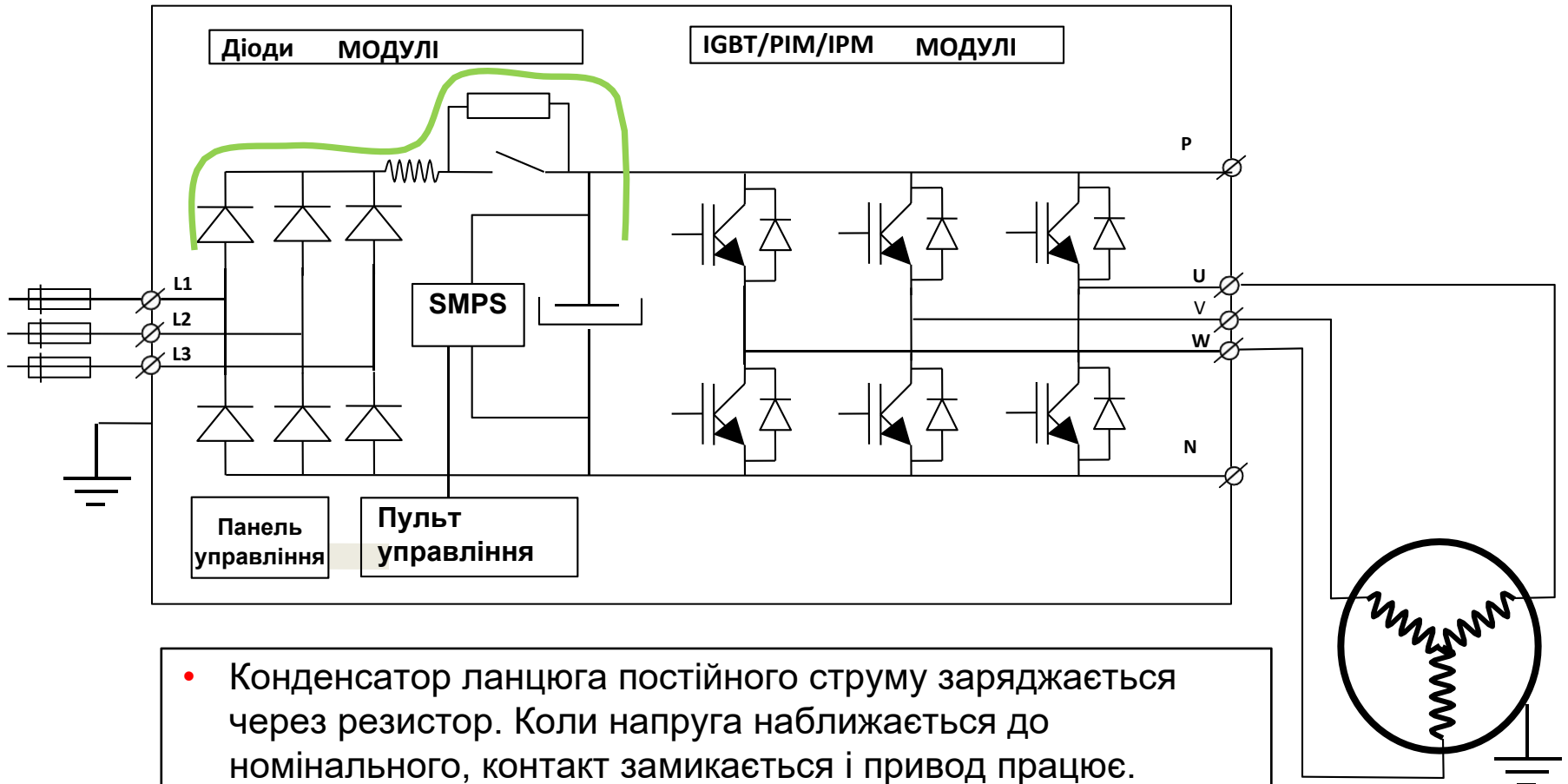


Схема заряду

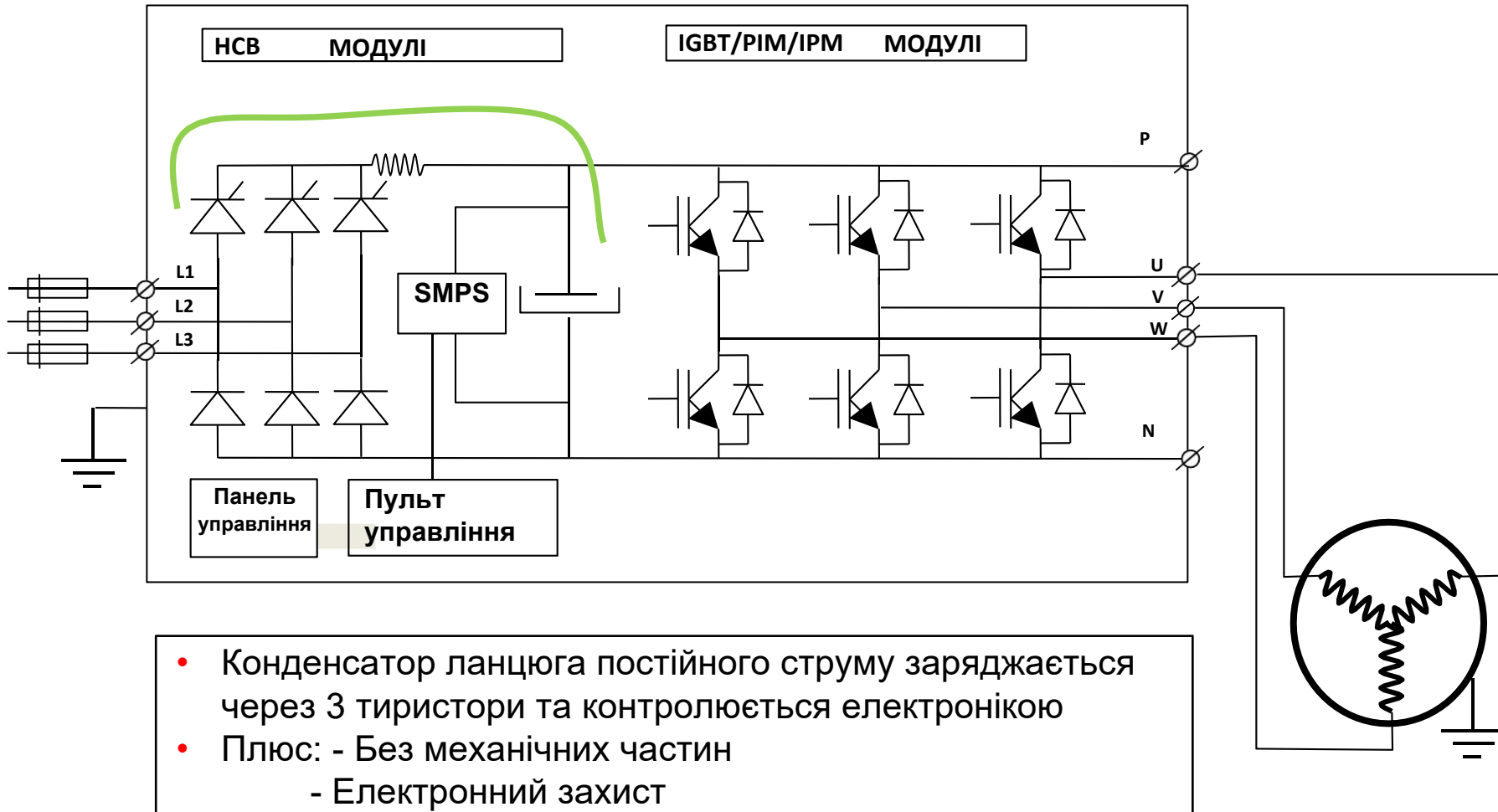
Ланка постійного струму

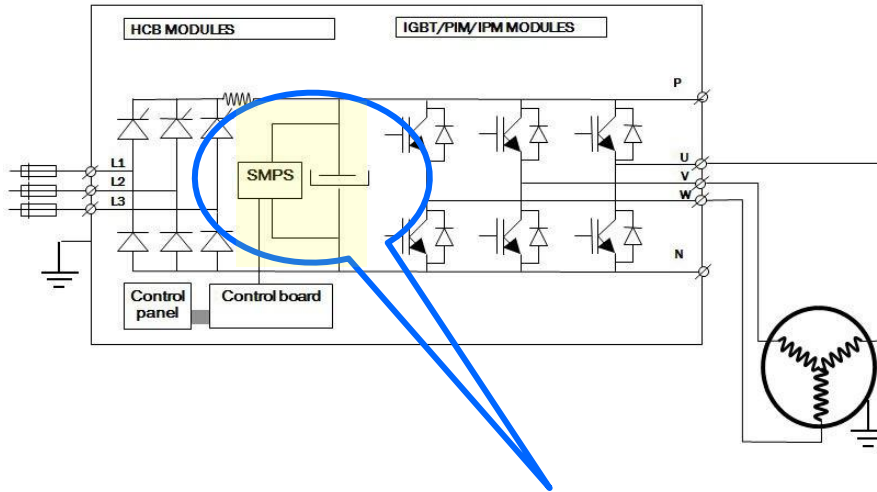




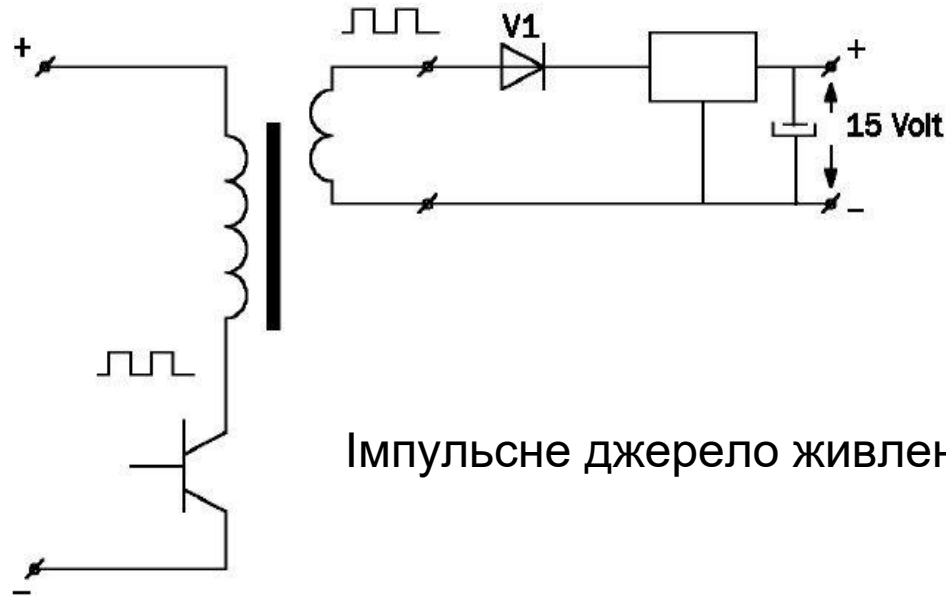
- Конденсатор ланцюга постійного струму заряджається через резистор. Коли напруга наближається до номінального, контакт замикається і привод працює.
- Плюс: проста схема
- Мінус: дорогі та громіздкі приводи великої потужності

Загальна схема з напівкерованим мостом НСВ

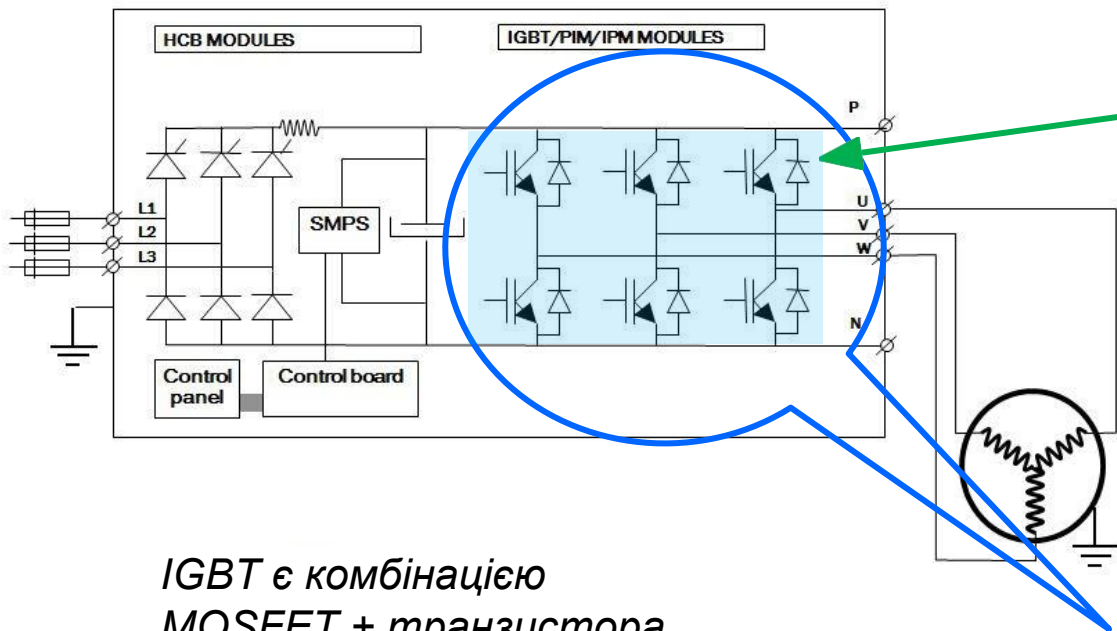




- Технологія SMPS використовується повсюдно; ноутбуки, зарядні пристрої для мобільних, світлодіодне освітлення, вся електронна техніка
- ККД 90-95%
- Широкий діапазон напруги
- Не чутливий до падінь/коливаний потужності
- Невелика конструкція



Імпульсне джерело живлення

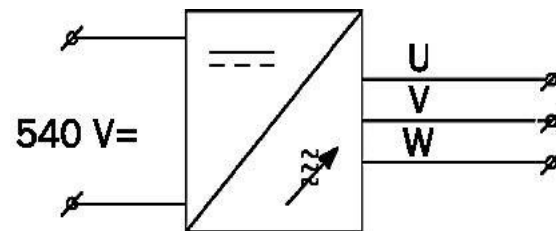
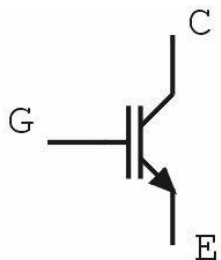


Діоди вільного ходу для реактивного струму

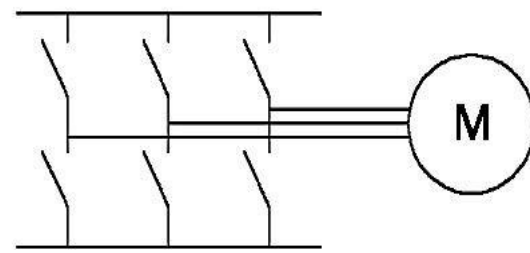
IGBT є комбінацією MOSFET + транзистора

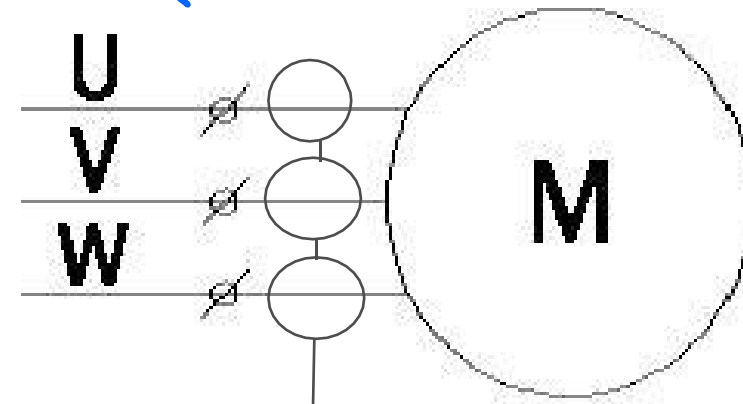
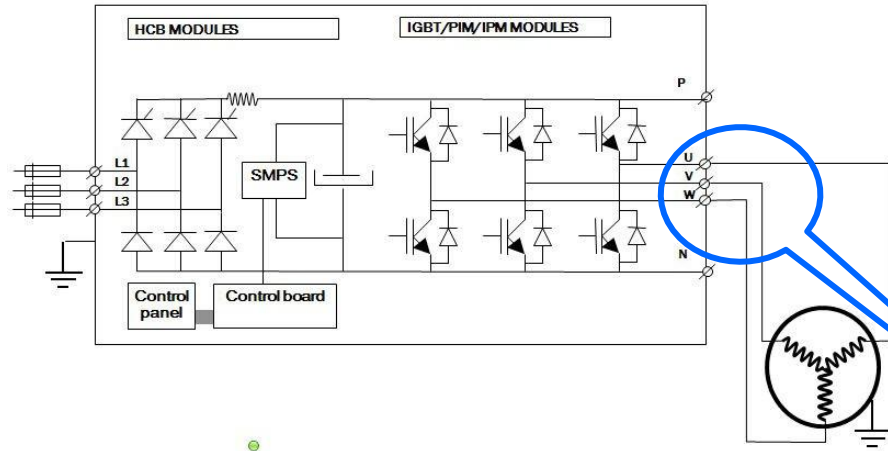


Модуль з 6 шт



Працює як 6 перемикачів





- Датчики струму для вимірювань
- IGBT захищає себе від перевантаження по струму (DESAT)

ШІМ = широтно-імпульсна модуляція

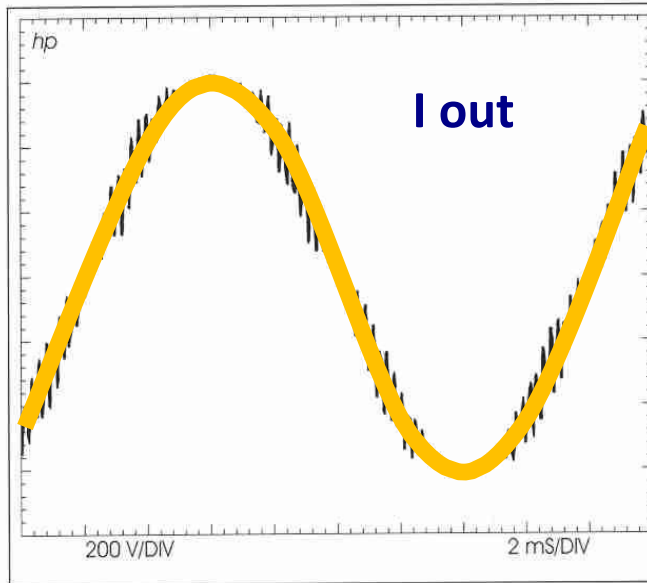
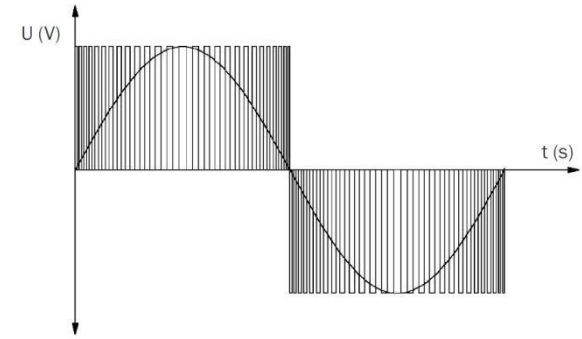
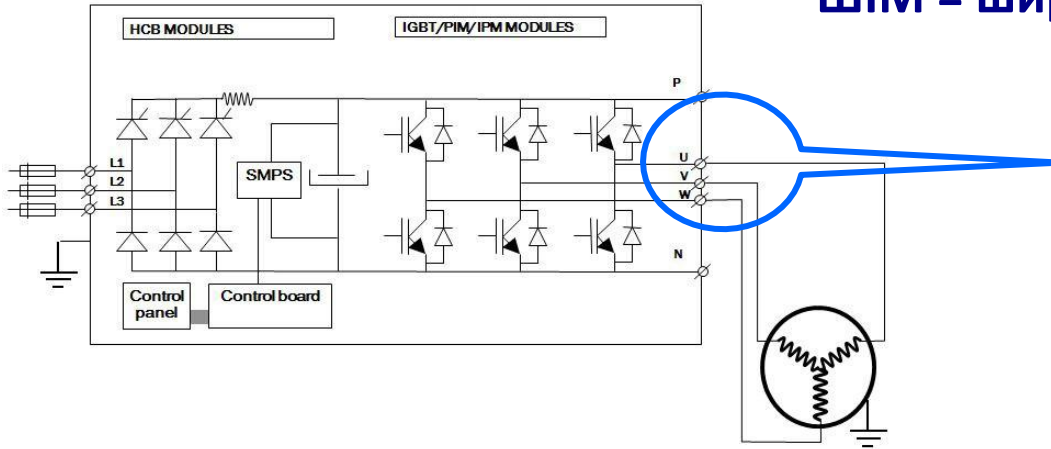


Abbildung 2 : Ausgangsspannung eines Sinusfilters einer Phase
Diagram 2 : one phase of the sinusoidal filter output voltage

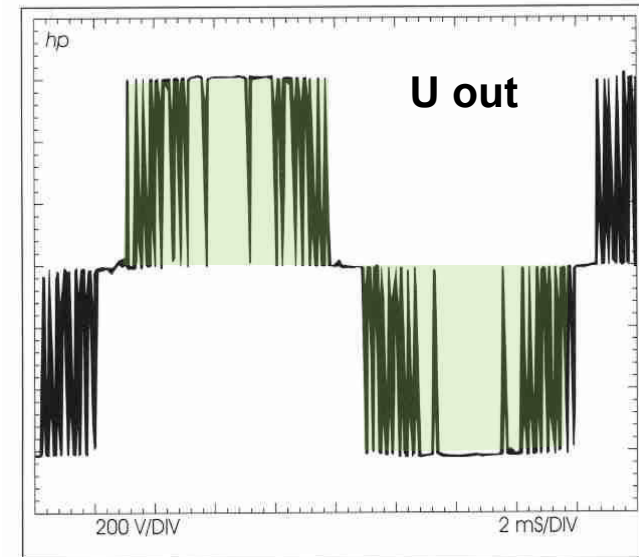
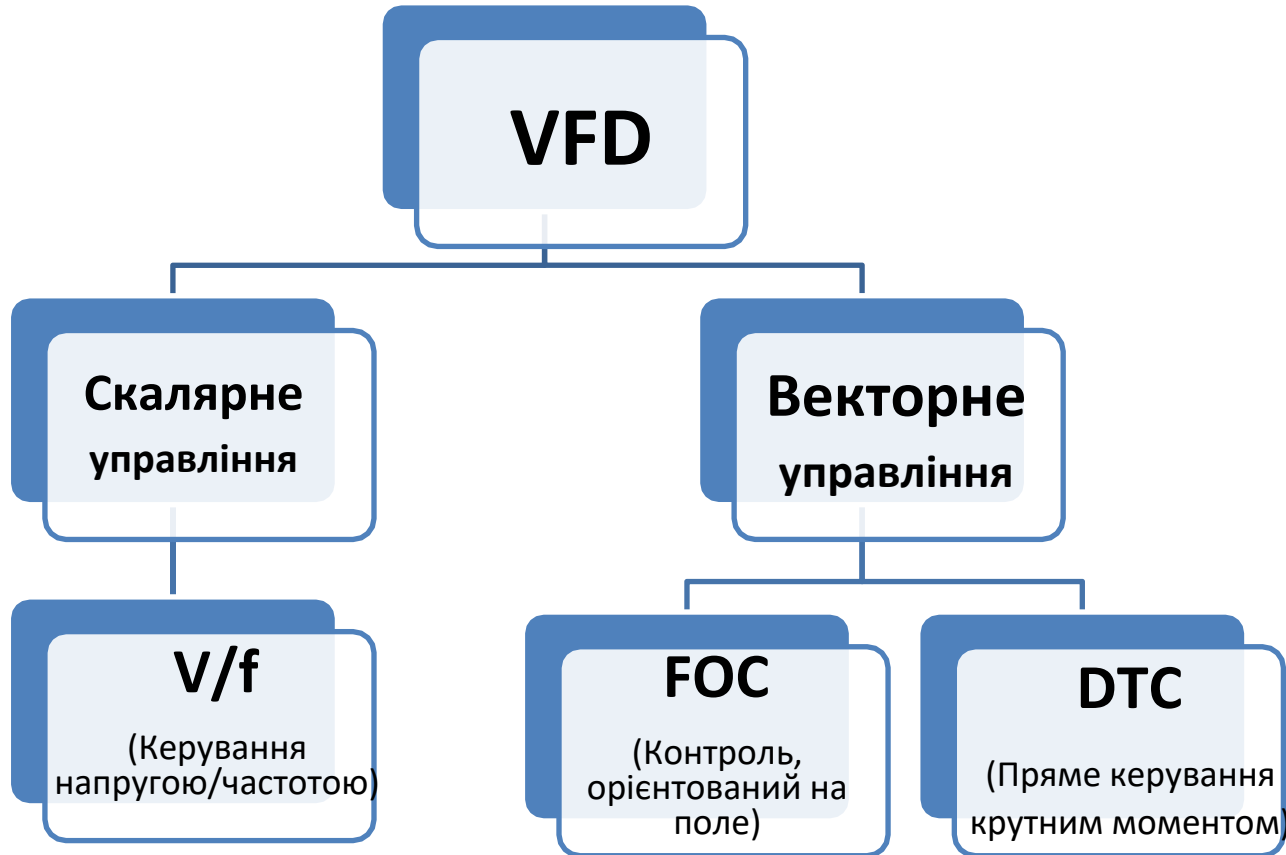


Abbildung 1 : Umrichter-Ausgangsspannung einer Phase
Diagram 1 : one phase of the frequency converter output

Огляд:

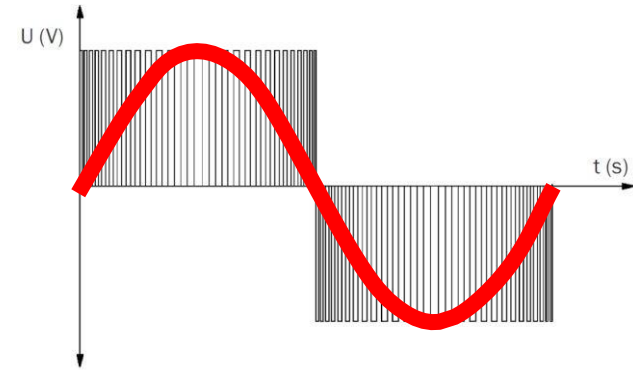


**УВАГА: різні постачальники використовують різну термінологію.
Завжди перевіряйте технічні характеристики!**

Загалом існує 2 різних принципи керування приводом :

• V/f керуванні модулятори

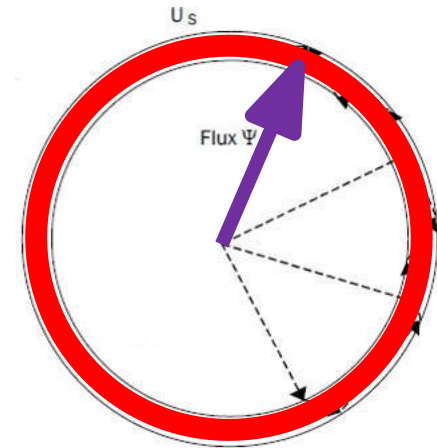
- ШІМ «широко-імпульсна модуляція»
(він же: В/Гц, скалярний, просторовий вектор ШІМ)
- ~ 80% усіх заявок,
низька/ нормальна динамічна продуктивність :
 - Вентилятори, насоси, повітрорудки, компресори, двигуни, конвеєри тощо.



Створить ідеальну синусоїду

• Модулятори з векторним керуванням

- Є 2 дуже схожих:
 - Орієнтоване на поле керування (FOC)
(він же: векторний потік, потік поля, VVC тощо)
 - Прямий контроль крутного моменту (DTC)
- ~ 20% усіх додатків,
висока динамічна продуктивність :
 - Крани, дробарки, екструдери, млини, змішувачі, інструментальні верстати
- Розімкнутий або закритий контур



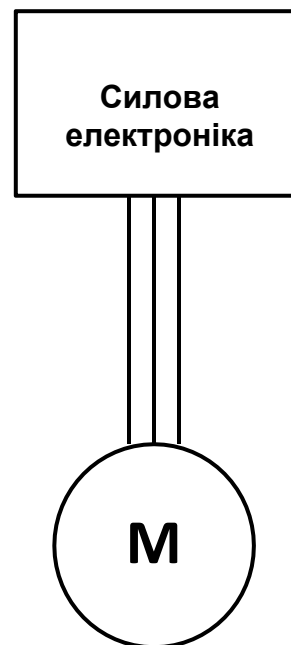
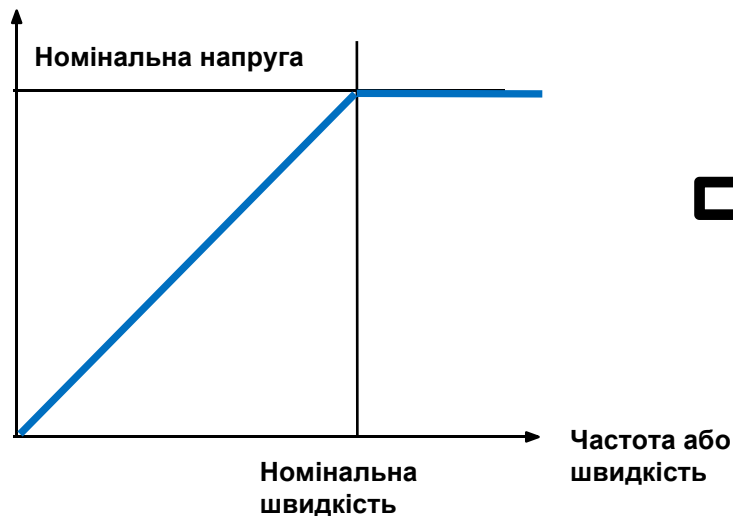
Створить ідеальний Flux > Torque

Модулятори з V/f

Надійне рішення для багатьох цілей

Один із способів керування асинхронною машиною:
фіксоване співвідношення між частотою та напругою
(це буде пояснено пізніше)

Амплітуда змінної напруги

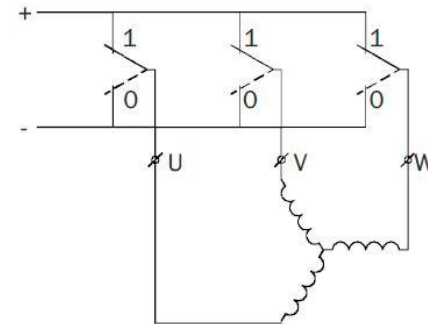
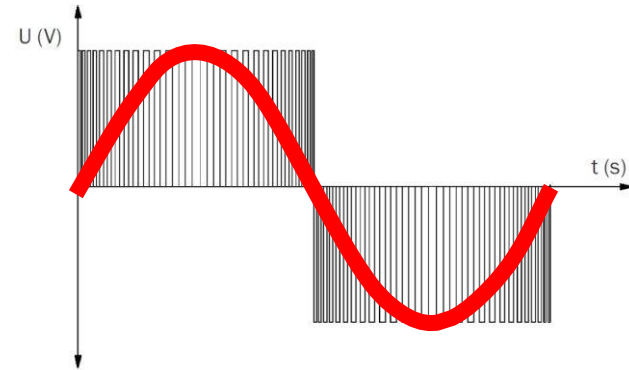


ШІМ: широтно-імпульсна модуляція

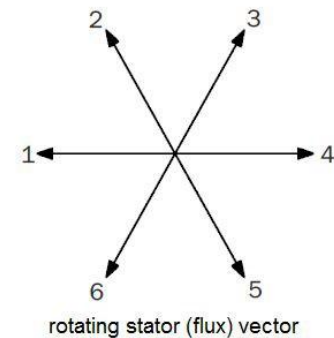
Голландський винахід, вперше на ринку в 1977 році, тепер із вдосконаленими технологіями:

Проста векторна модуляція потоку (наприклад, просторовий вектор ШІМ):

- Покращений ШІМ модулятор
- Націлений на статор тільки для створення синусоїди
- Завжди застосовує векторну послідовність на виході без вимірювання
- Можна включити модель машини для оптимізації продуктивності



U	V	W	Flux-vector
0	0	1	1
1	0	1	2
1	0	0	3
1	1	0	4
0	1	0	5
0	1	1	6
1	1	1	7
0	0	0	0



Основна перевага:

- Дуже міцний = нечутливий до якості параметрів двигуна («емуляція джерела живлення зі змінною частотою та напругою»)

Обмеження:

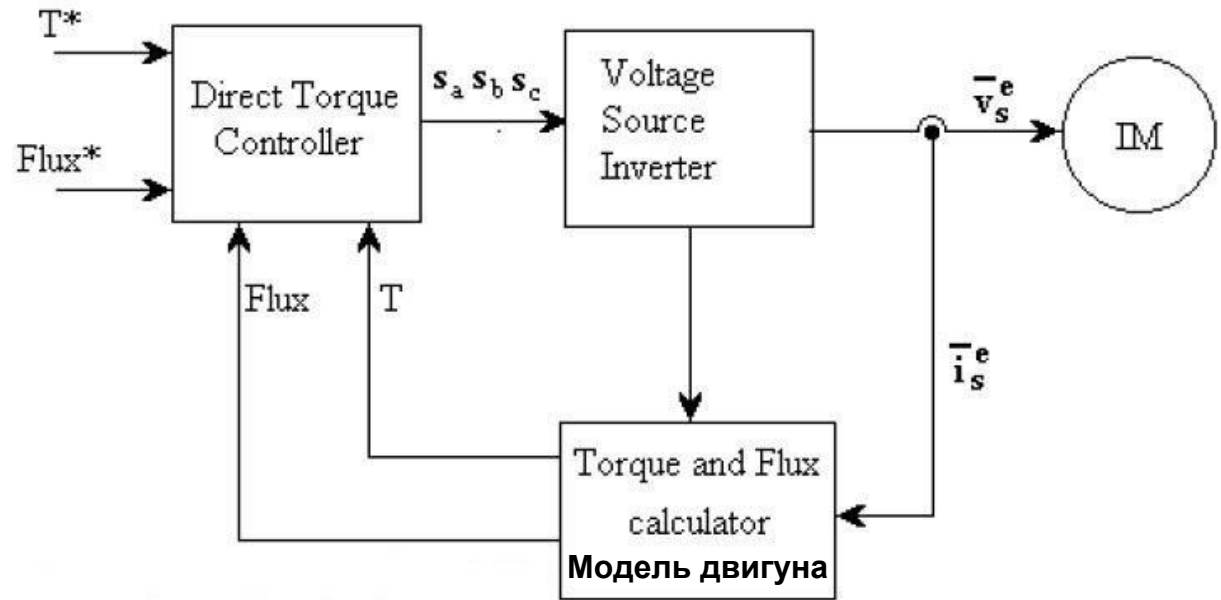
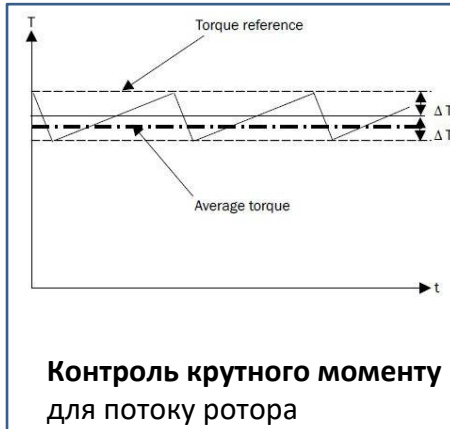
- Тому немає контролю за фактичним станом машини
- Низькі динамічні характеристики
- Обмежений крутний момент доступний на низькій швидкості (доступний ІЧ-комп.)

Точність (приблизно)

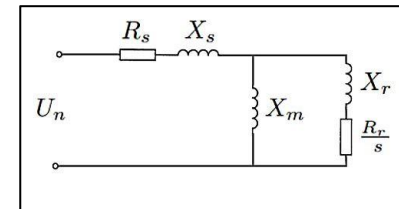
- Точність регулювання швидкості:
 - 50%-20% ковзання, (наприклад: $n_{nom} = 1460$ об/хв, точність 20 об/хв)
 - Діапазон контролю: 1-50
- Точність крутного моменту:
 - 20-100% швидкість : 10-20%

Модулятори з векторним керуванням

Типова конфігурація



Модель двигуна:



Модулятори з векторним керуванням

FOC: Field Oriented Control і DTC: Direct Torque Control

- Основні відмінності між **FOC** і **DTC** полягають у способі виконання розрахунків і оцінок.
- Найважливішими є відмінності в точності швидкості та крутного моменту, як статичного, так і динамічного.
- Розрахунок FOC орієнтований на поле ротора
- Розрахунки DTC орієнтовані на поле статора
- Контролюйте крутний момент вала опосередковано, вимірюючи та контролюючи струм і напругу, щоб отримати правильний потік намагнічування.
- Швидкість ротора зворотного зв'язку (кодувальник із замкнутим контуром) або оцінена (розімкнутий контур)
- Струм двигуна вимірюється, а потік намагнічування оцінюється/розраховується за допомогою керування математичною моделлю двигуна.
- Немає статичного модулятора, але створює новий вектор напруги кожні 25 мкс (тобто 40 кГц) (DTC)
- Включає модель машини для отримання реального стану змінних двигуна в кожному моменті

Модулятори з векторним керуванням

Безсенсорне керування (розімкнутий контур) на нульовій швидкості

- Для більшості застосувань було б краще керувати двигуном без зворотного зв'язку кодера. Однак більшість безсенсорних методів керування, орієнтованих на поле, не дають оптимальних результатів на низькій або нульовій швидкості. З цього приводу є деякі винятки, які з'явилися лише в останні кілька років
- Якісне безсенсорне поле-орієнтоване керування можливе лише за допомогою високоякісних алгоритмів для оцінки швидкості.
- Додатку, що працює на нульовій швидкості або дуже близько до неї, завжди потрібен зворотний зв'язок кодера (замкнутий цикл)
 - Крани: підйомні
 - Лебідки



Модулятори з векторним керуванням

Переваги:

- Дуже **швидка ступінчаста реакція крутного моменту** та швидкості можлива в закритому та відкритому контурі (без датчиків), якість ступінчастої реакції дуже залежить від марки
- Більший крутний момент, ніж у звичайних інверторів на низькій частоті
- Більший крутний момент на ампер
- Швидке керування гарантує регульований максимальний крутний момент
- Механічне визначення розмірів легше (макс.-мін. рівні крутного моменту)

Обмеження:

- Можлива робота **ЛИШЕ** одним двигуном
- Вихідні фільтри, такі як синусоїдні фільтри, впливають на обчислення/продуктивність
- Довгі кабелі двигуна також впливають на обчислення/продуктивність
- Налаштування даних двигуна є більш критичним

Модулятори з векторним керуванням

Точність

- Різні бренди використовують різні способи визначення. (% , RPM, статичні, динамічні, час відгуку, діапазон керування, діаграма Боде тощо)
- Те, що написано в специфікаціях, буде досягнуто лише за умов **ІДЕАЛЬНІ** умови.

FOC : Field Oriented Control DTC : Field Oriented Control

Точність регулювання швидкості OPEN LOOP:

- **0,5% $n_{ном}$**

Точність регулювання швидкості ЗАМКНУТИЙ КОНТУР:

- **0,1% $n_{ном}$**

Точність крутного моменту OPEN LOOP:

- **20-100% швидкість: 10-20%**
- **0-10% швидкість: 20%**

Точність крутного моменту ЗАМКНУТИЙ КОНТУР:

- **0-100% швидкість: 5%**

Точність регулювання швидкості OPEN LOOP:

- **0,1% $n_{ном}$**

Точність регулювання швидкості ЗАМКНУТИЙ КОНТУР:

- **0,01% $n_{ном}$**

Точність крутного моменту OPEN LOOP:

- **0-100% швидкість: 5%**

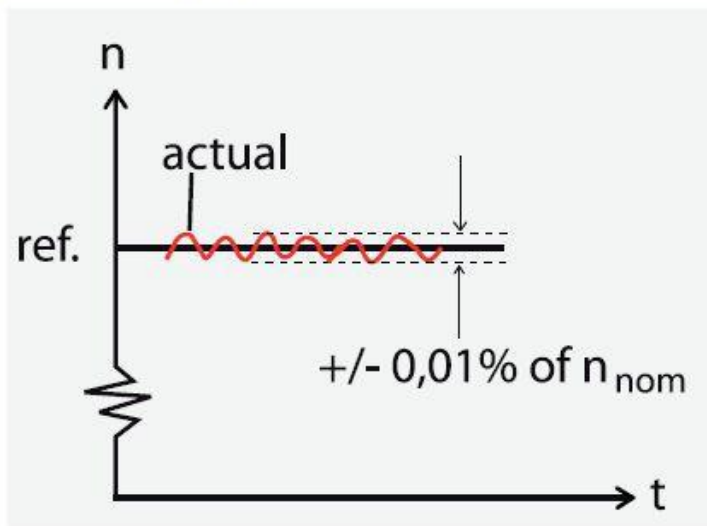
Точність крутного моменту ЗАМКНУТИЙ КОНТУР:

- **0-100% швидкість: 1%**

Модулятори з векторним керуванням

Типовий приклад специфікацій DTC:

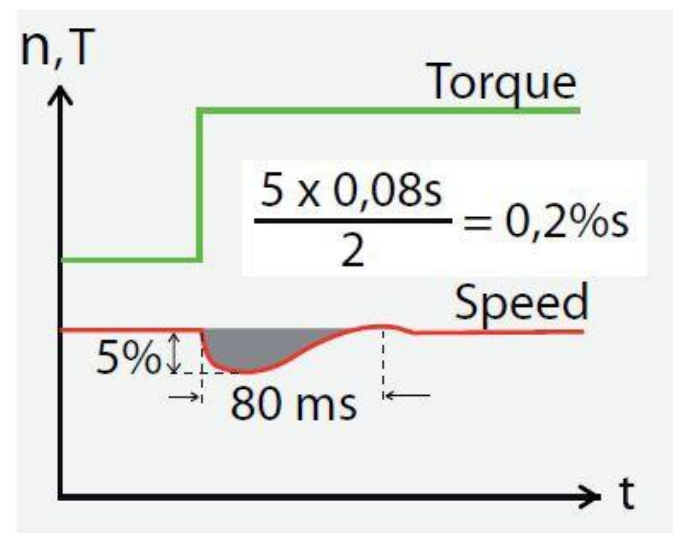
Speed control static accuracy (linearity):



Closed loop = 0.01% of n_{nom} .

Open loop = 0.1% of n_{nom} .

Speed Control dynamic accuracy (impact drop):



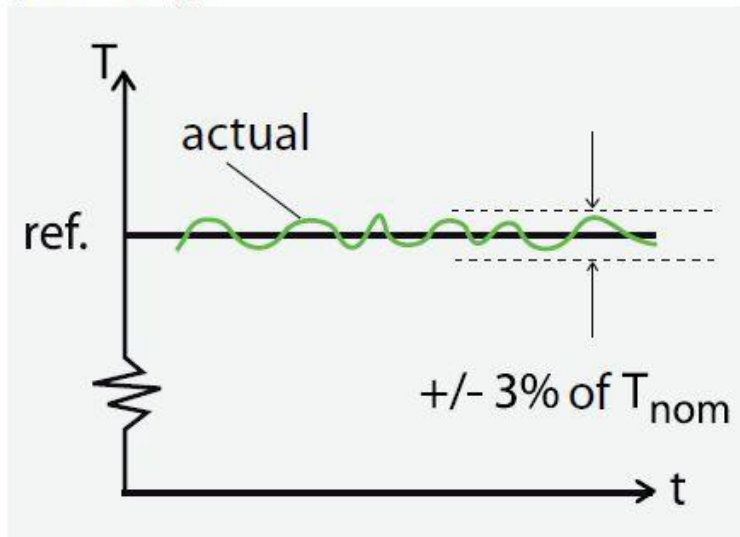
Closed loop = 0.2%sec (100% load step)

Open loop = 0.4%sec (100% load step)

Модулятори з векторним керуванням

Типовий приклад специфікацій DTC:

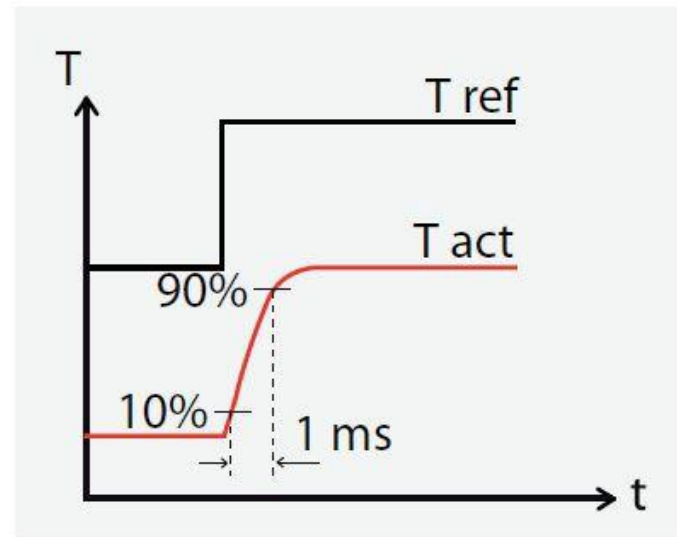
Torque control static accuracy (linearity):



Closed loop: $<3\%$ of T_{nom}

Open loop: $<3\%$ for speeds 10 - 100% of rated, and $<10\%$ at zero speed (% of n_{nom}).

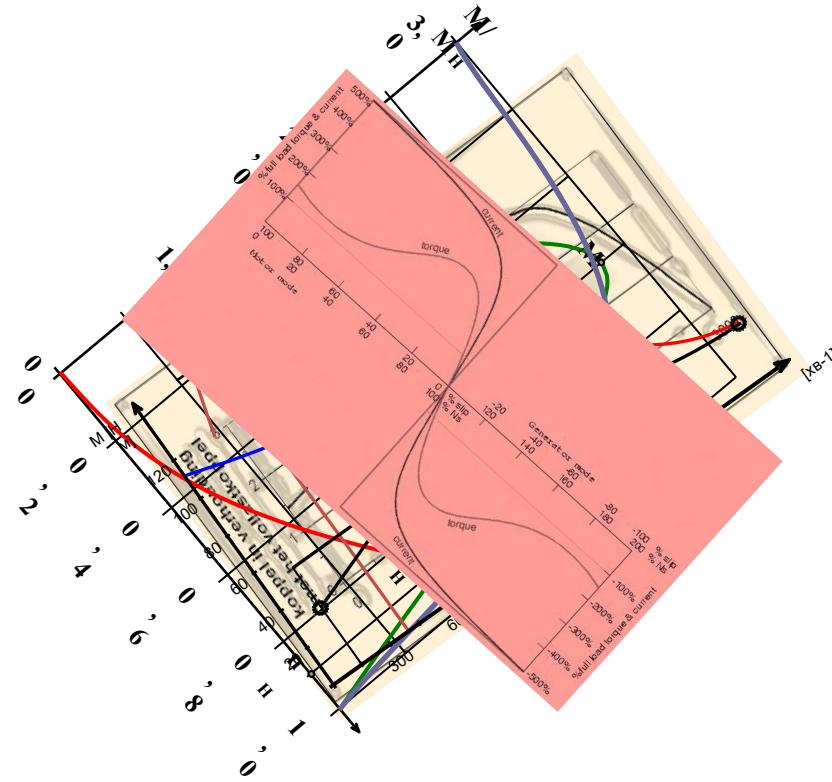
Torque control dynamic accuracy:

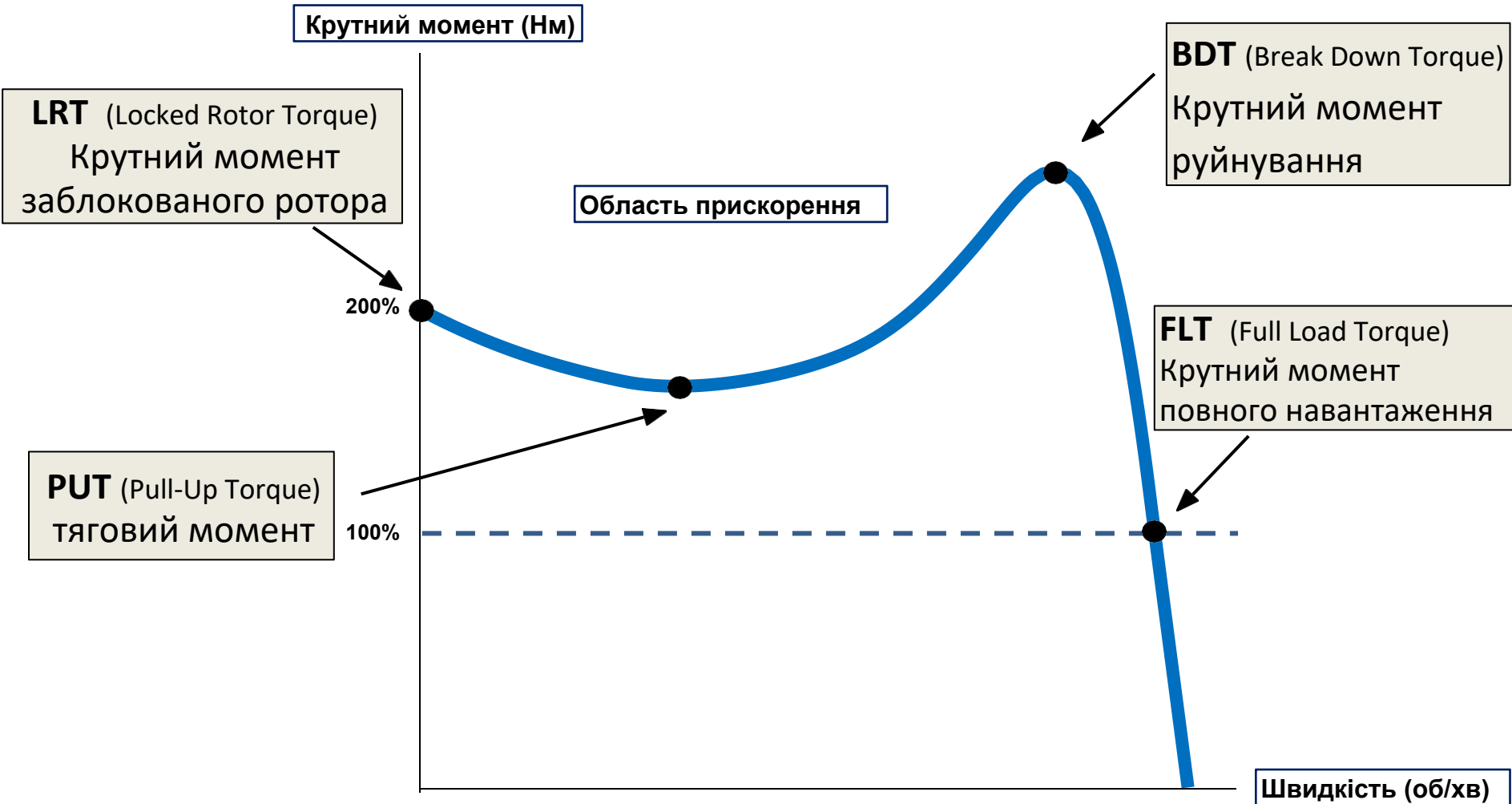


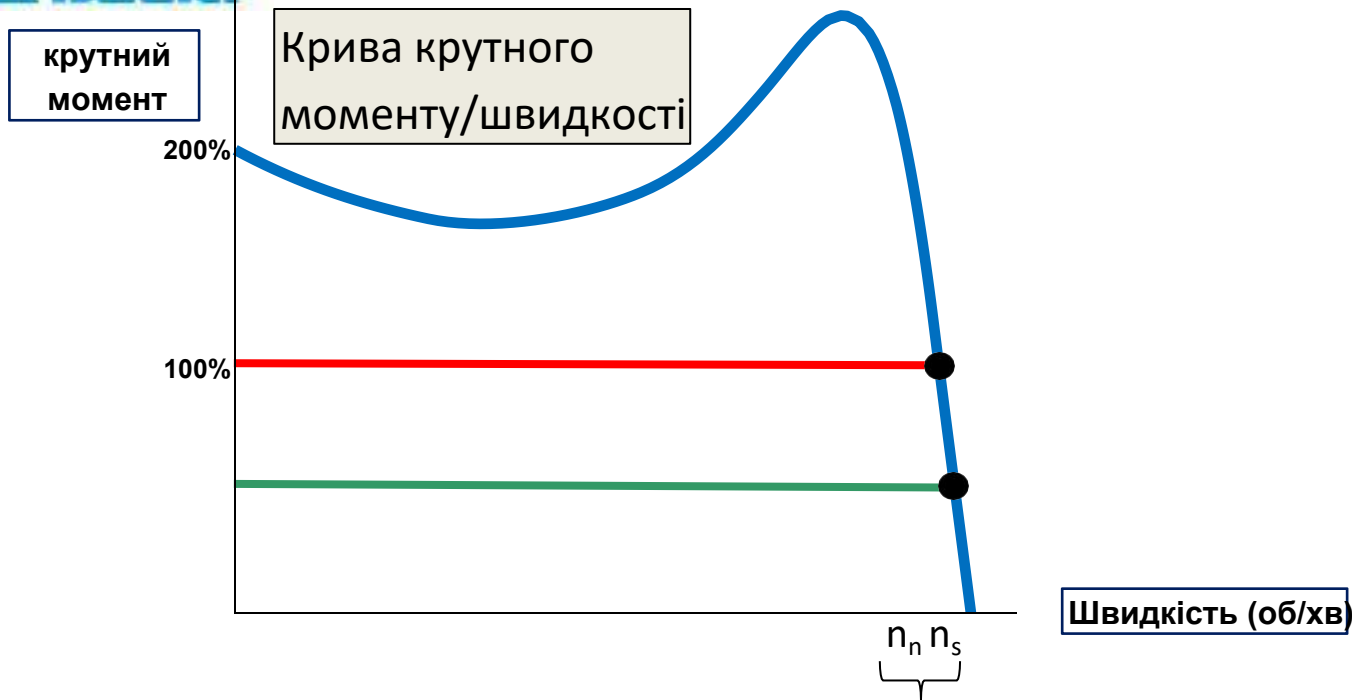
Closed and open loop:

100% torque step rise time = 1 ms.

Криві крутного моменту / швидкості







$$s = \frac{n_{syn} - n_{nom}}{n_{syn}}$$

$$n_{nom} = n_{syn} \times (1 - s) \quad s = \text{КОВЗАННЯ (slip)}$$

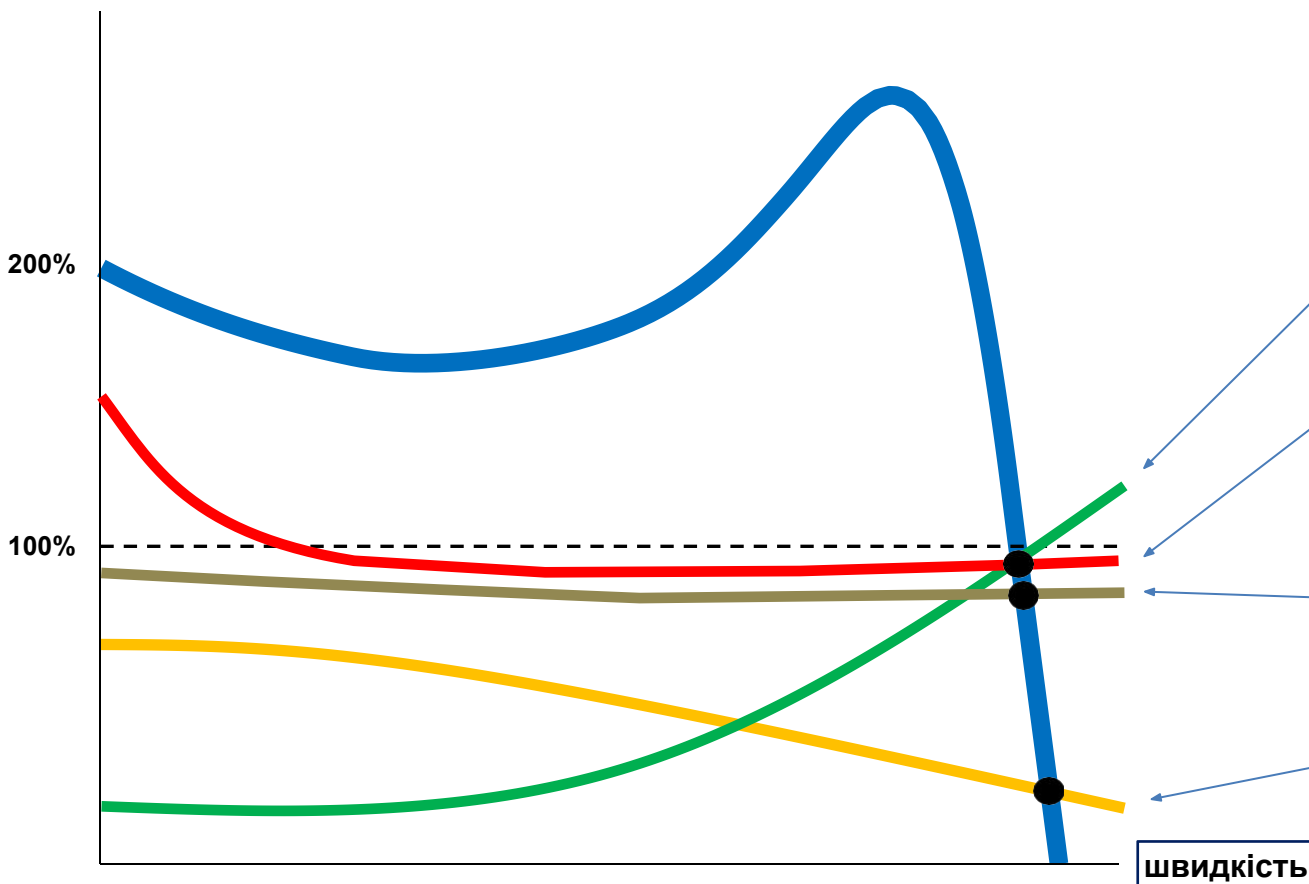
Ситуація 1: Номінальне навантаження, номінальна швидкість, номінальне ковзання

Ситуація 2: Менше навантаження, ковзання зменшується, вища швидкість

Фактична (асинхронна) швидкість ротора залежить від навантаження!!

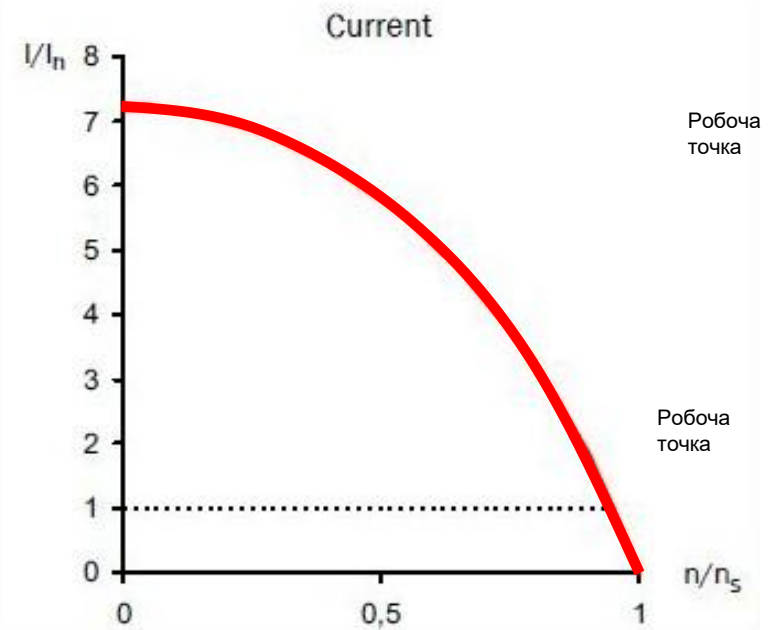
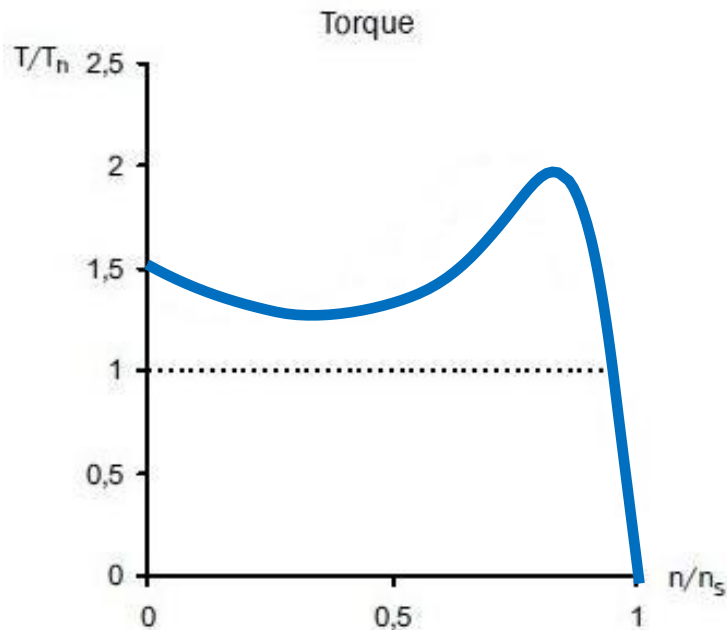
Крива навантаження машини, підключеної до двигуна, має великий вплив на спосіб запуску та поведінку при запуску

крутний момент

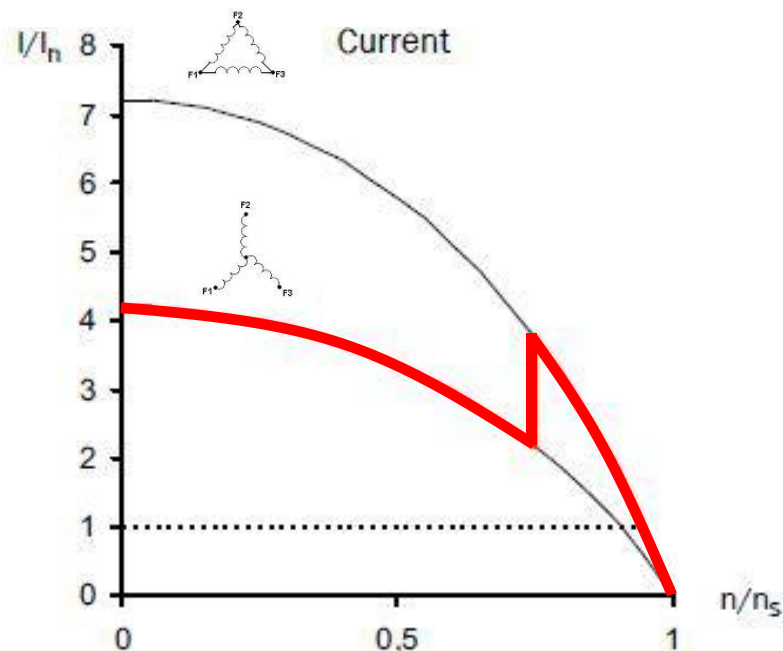
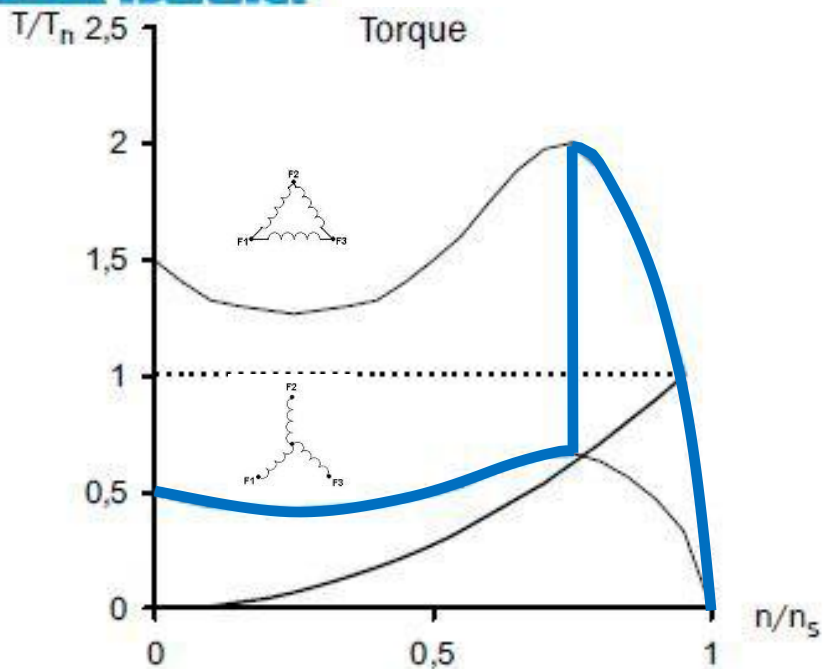


- **Квадратичні навантаження,** відцентрові насоси та всі вентилятори
- **Високі пускові моменти,** дробарки, мононасоси, центрифуги
- **Постійні навантаження,** Конвеєр
- **Зменшення навантажень,** (постійна потужність), Верстати інструментальні, свердлильні, шліфувальні

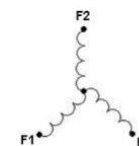
швидкість



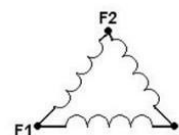
- Запуск D.O.L. (Direct On Line) дасть ці криві крутного моменту та струму
- Пускові струми можуть бути до 7-8 разів $I_{НОМ}$



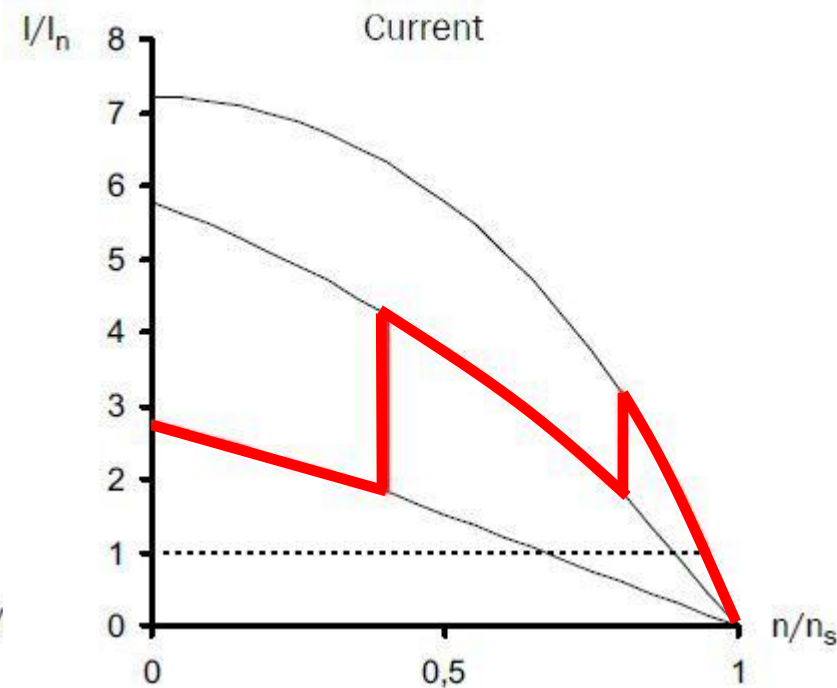
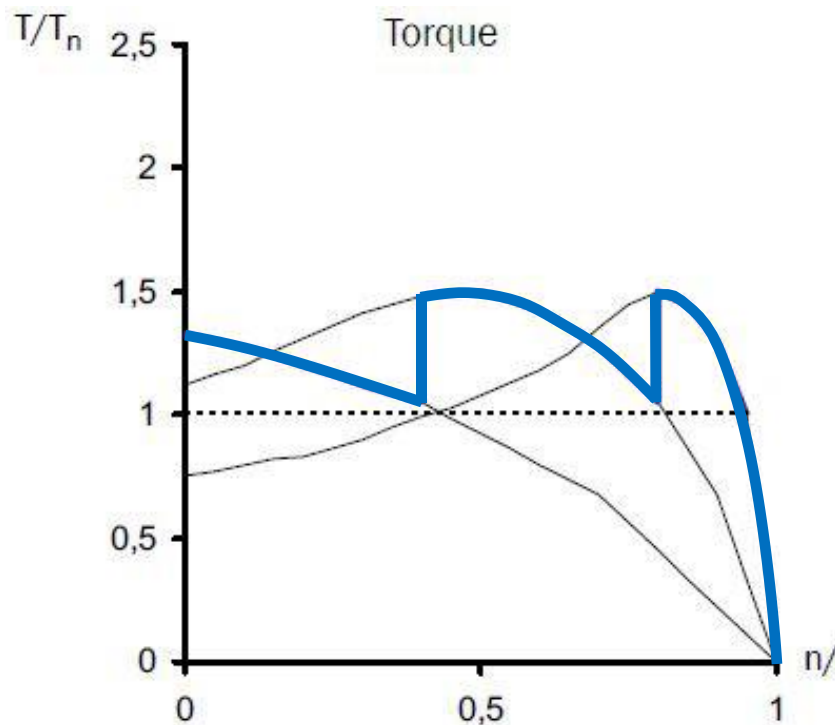
- Початок з підключення високої напруги (690 В), з низькою напругою (400 В)
- Переключіться на підключення НИЗЬКОЇ напруги
- Тому це неможливо з двигуном 230/400 В при мережі 400 В
- 2 піки струму
- 2 піки крутного моменту, механічне навантаження!



= Зірка 690В



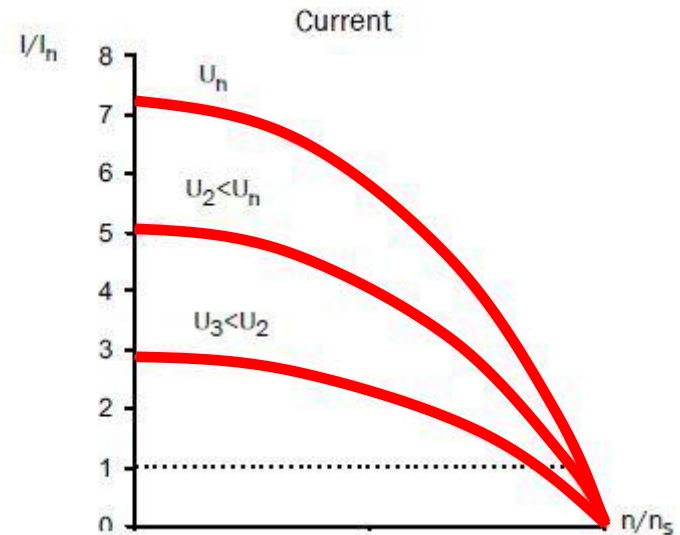
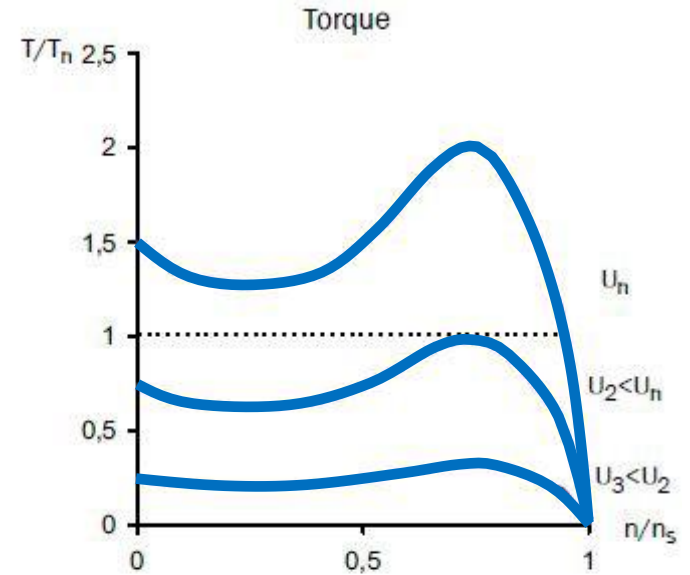
= Трикутник 400 В

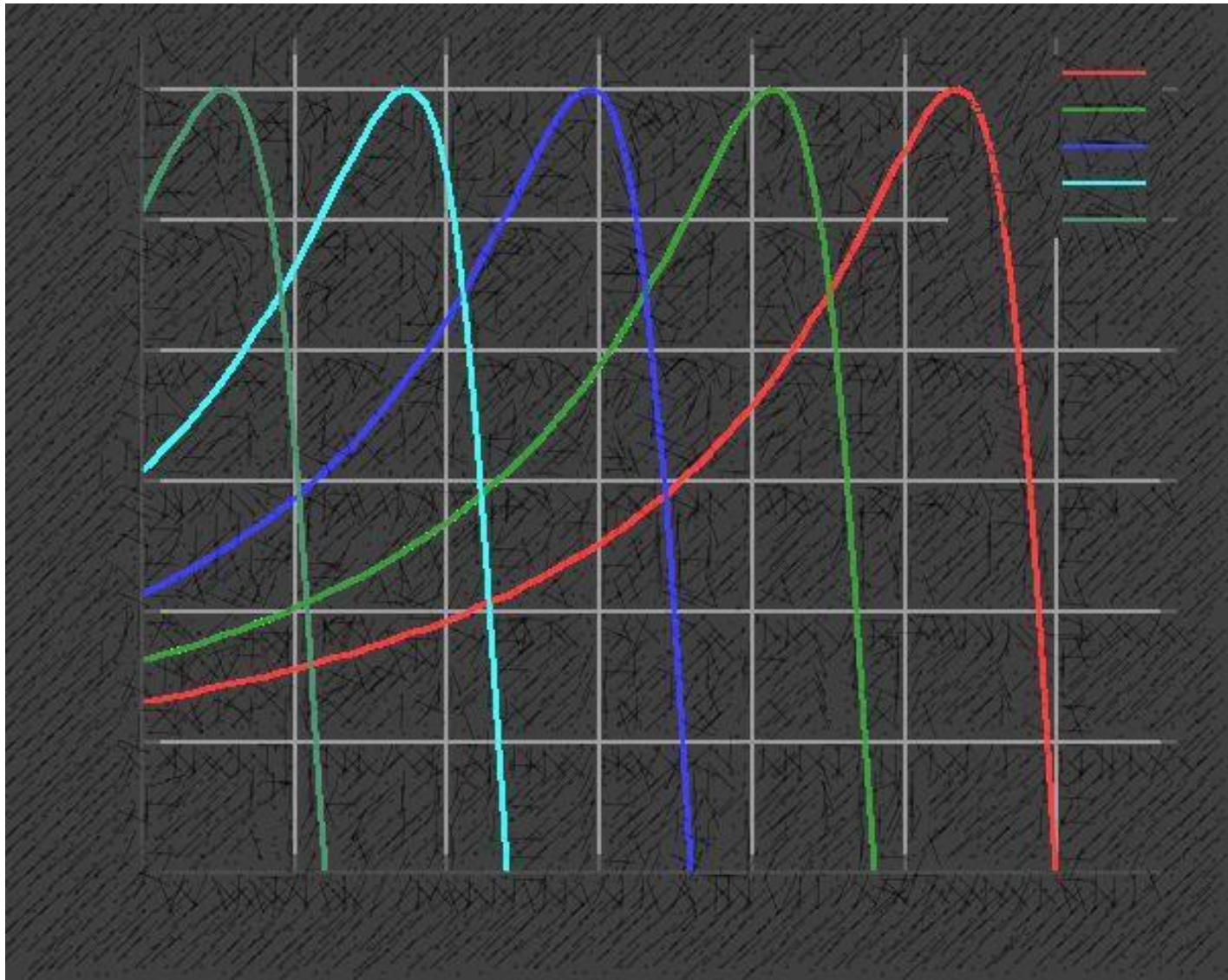


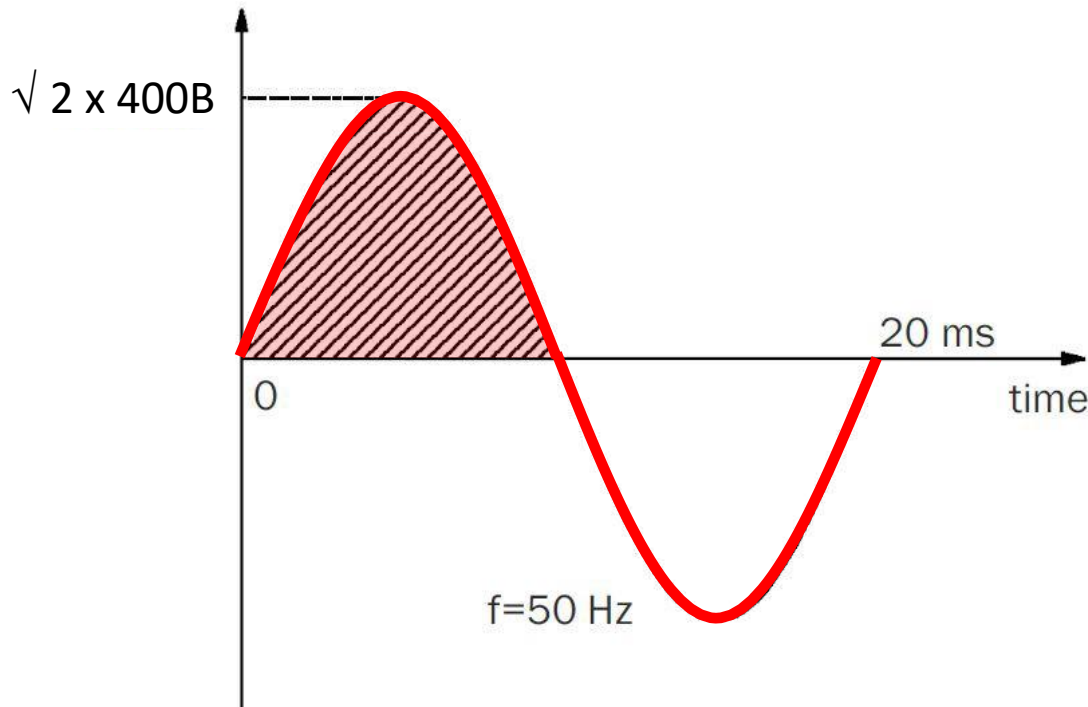
- 3 піки струму
- 3 піки крутного моменту, механічне навантаження!

- Крутний момент є квадратичним залежно від напруги
- Отже, якщо струм у 2 рази менший через нижчу напругу, крутний момент у 4 рази менший

$T \sim I^2$
 $I_{LV} = 1/2 I_{DOL} \rightarrow T_{LV} \approx 1/4 T_{DOL}$
 $I_{LV} = 1/3 I_{DOL} \rightarrow T_{LV} \approx 1/9 T_{DOL}$
 LV=low voltage
 DOL=Direct on-line







- Потік (магнітне поле) визначається областю напруги-часу прикладеної напруги

$$\Phi \approx E / \omega_s$$

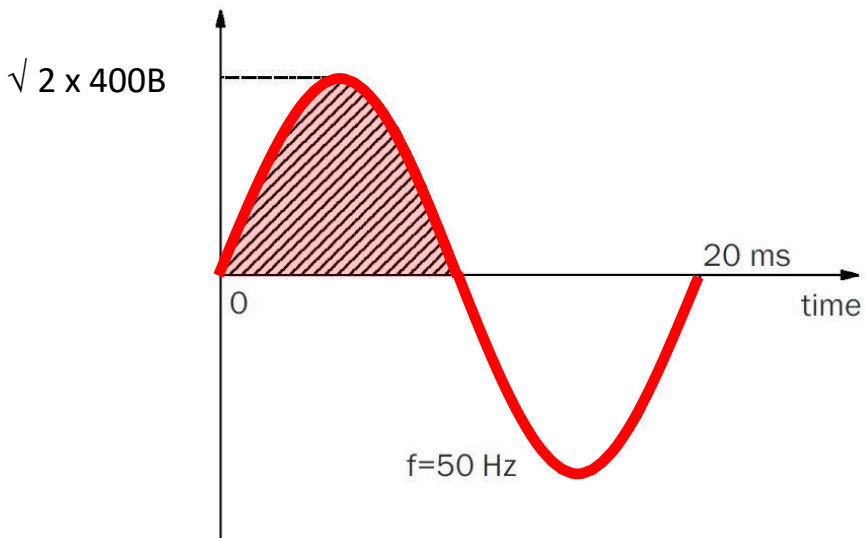
Φ = потік

E = напруга

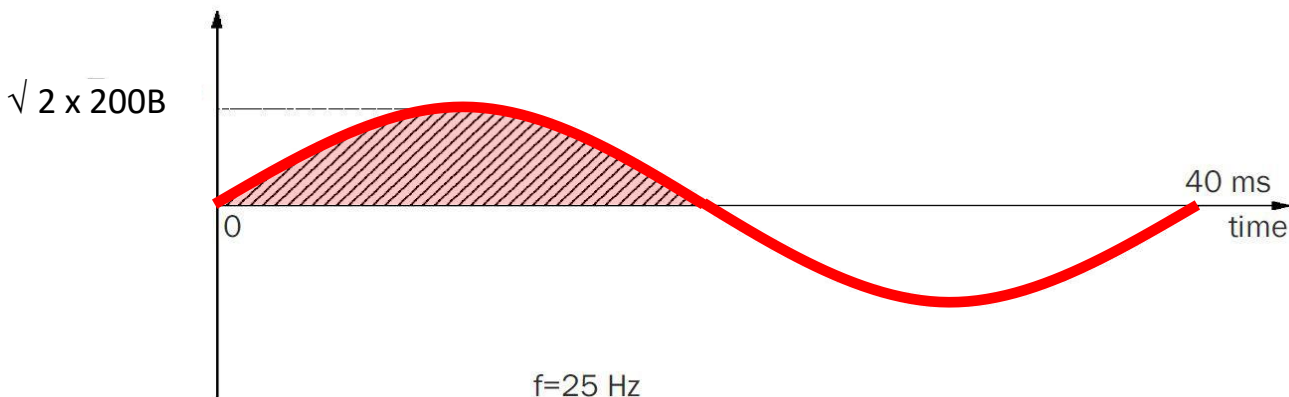
ω_s = кутова швидкість

- З VSD частота буде змінюватися, тому нам потрібно підтримувати постійний FLUX на кожній частоті

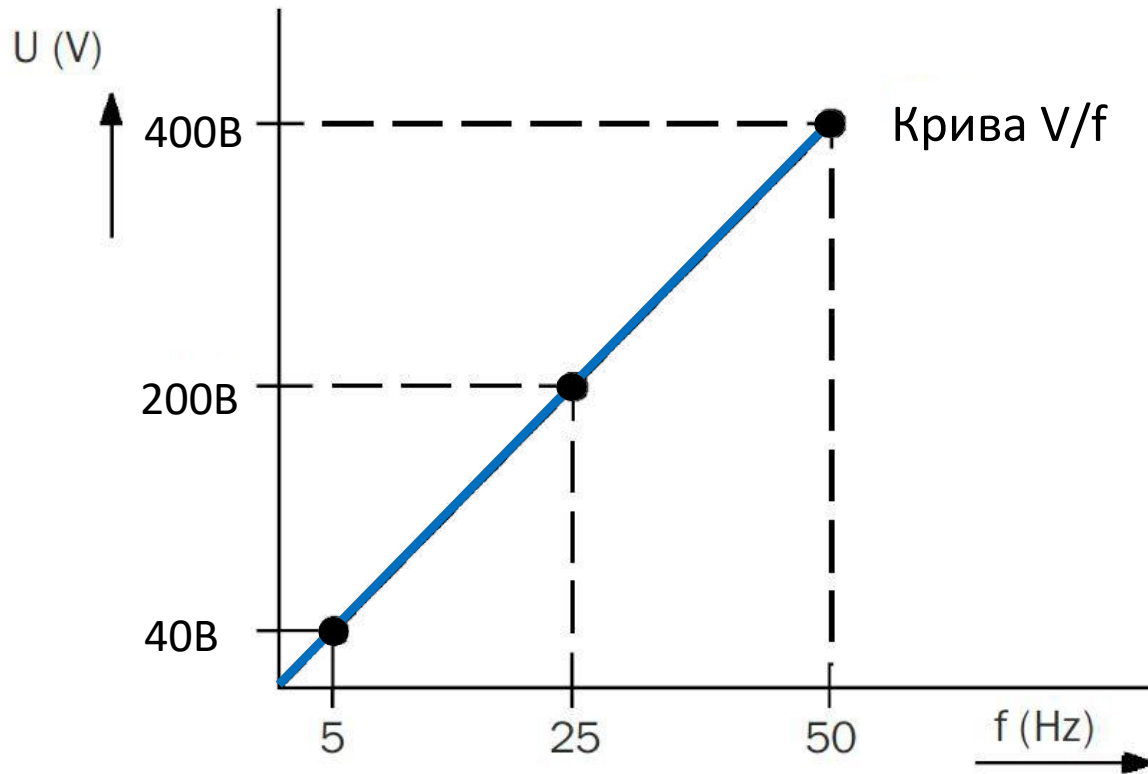
Потік в двигуні



- Отже, при частоті 50% верхня напруга також буде 50%
- У цьому випадку FLUX буде постійним



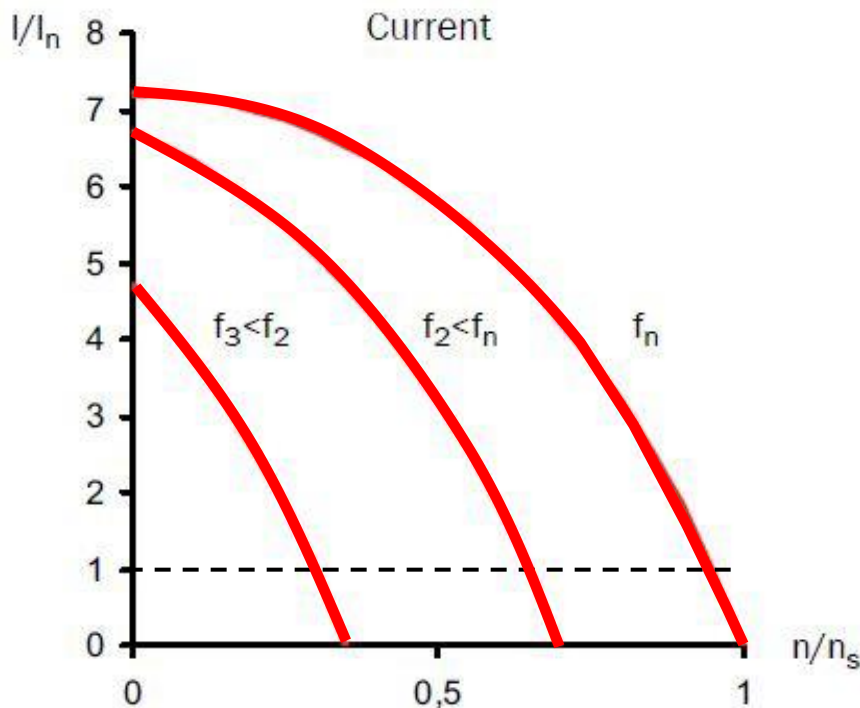
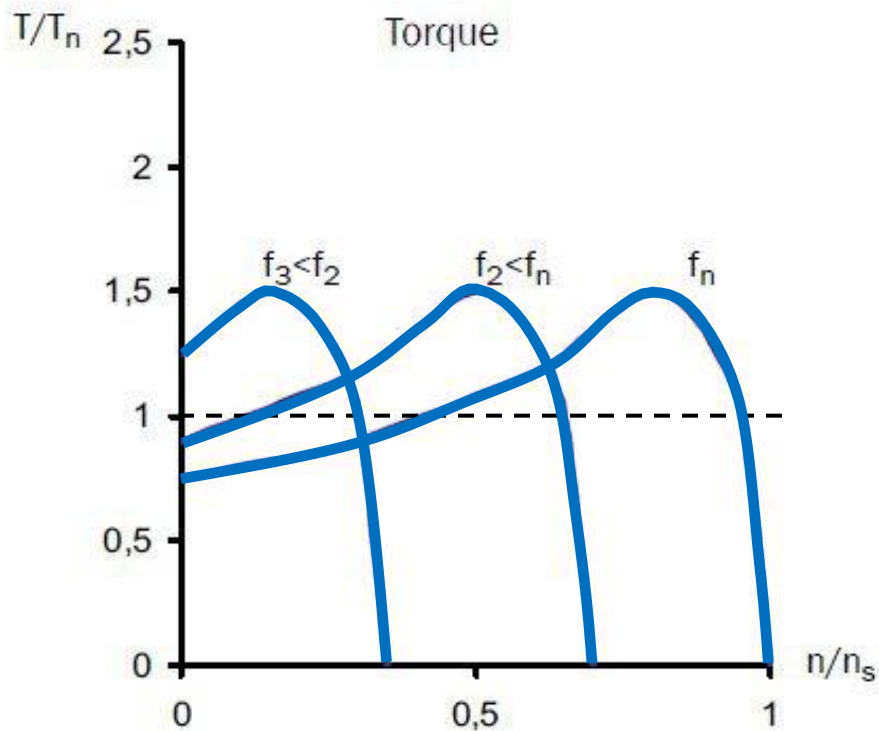
Співвідношення В/Гц



Значення В/Гц залишається постійним під час регулювання частоти:

$$\text{Співвідношення } V/f = 400 \text{ В} / 50 \text{ Гц} = 200 \text{ В} / 25 \text{ Гц} = 8,0 \text{ В} / \text{Гц}$$

Потік залишається постійним навіть на низьких частотах!

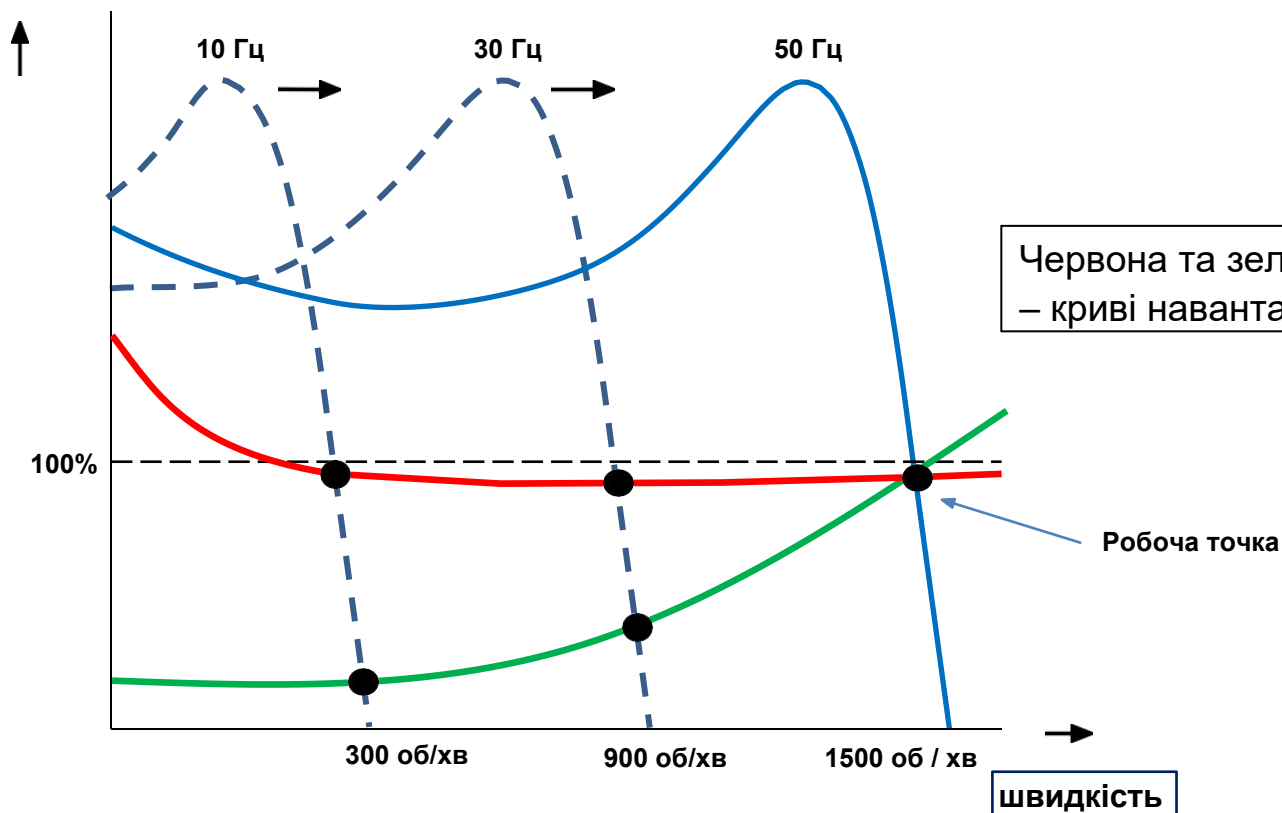


Крива крутний момент / швидкість рухається поперек швидкості вала

Починаючи з приводу: робоча точка

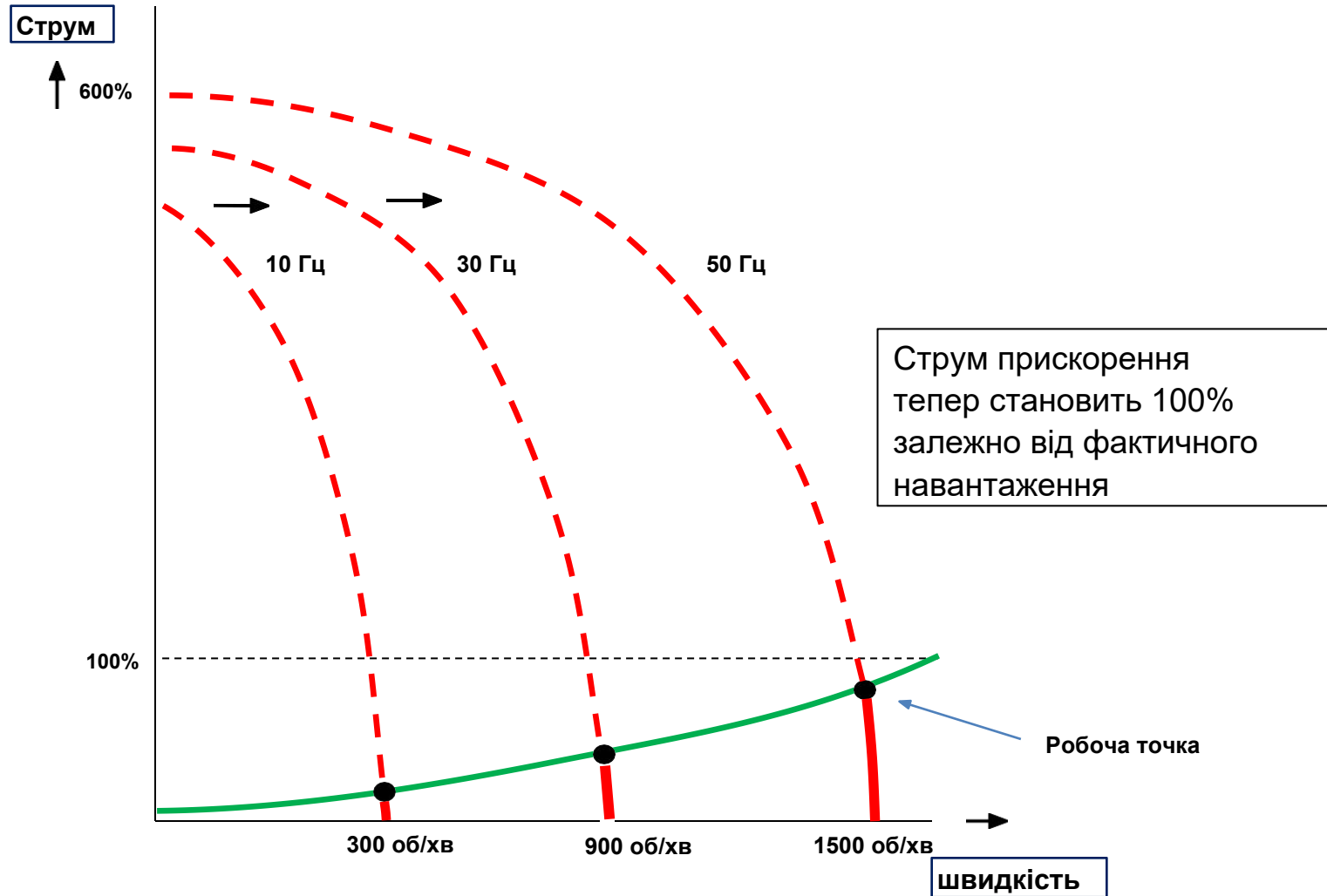
- Двигун завжди запускається в **робочій точці** кривої.
- Крива крутного моменту рухається зліва направо по кривій швидкості
- **Розгін номінальним струмом!**

крутний момент

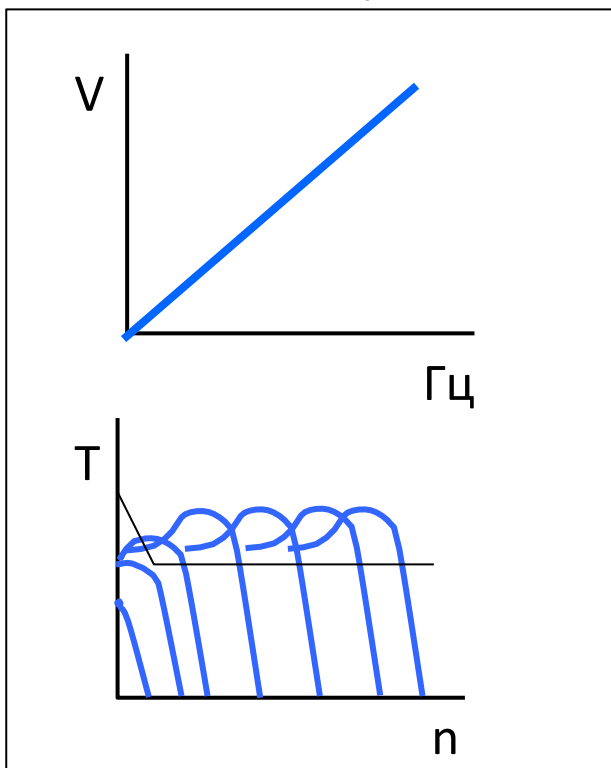


Починаючи з приводу: робоча точка

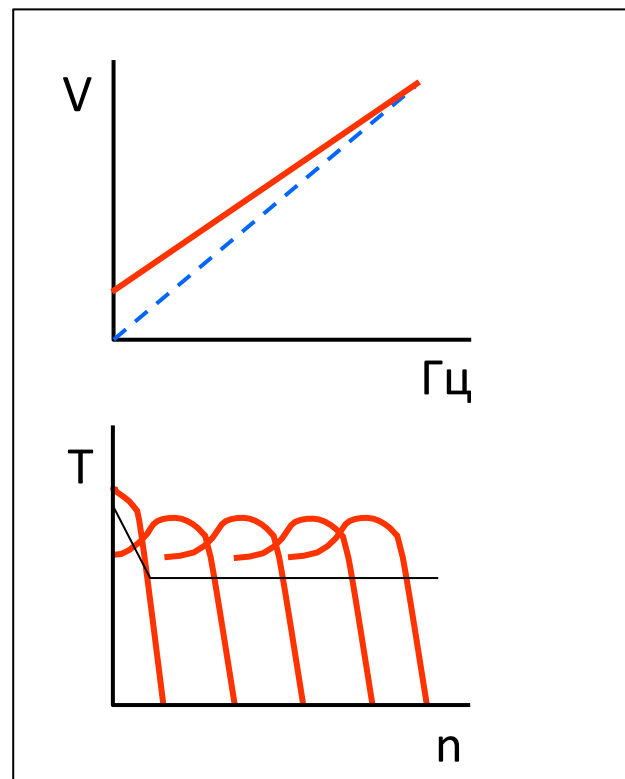
• Розгін з номінальним струмом за кривою навантаження!



- Компенсує ослаблення поля на низькій частоті
- При низькій частоті X_L (реактивний опір) обмотки статора зменшується відносно R_S (омічний опір). Це спричиняє падіння напруги і, отже, падіння крутного моменту. Компенсація $I \times R$ необхідна при запуску, наприклад, при високих пускових моментах.
- Початкові піки крутного моменту
- Застосування з початковими піками крутного моменту, наприклад, шнекові конвеєри або машини з холодним пуском

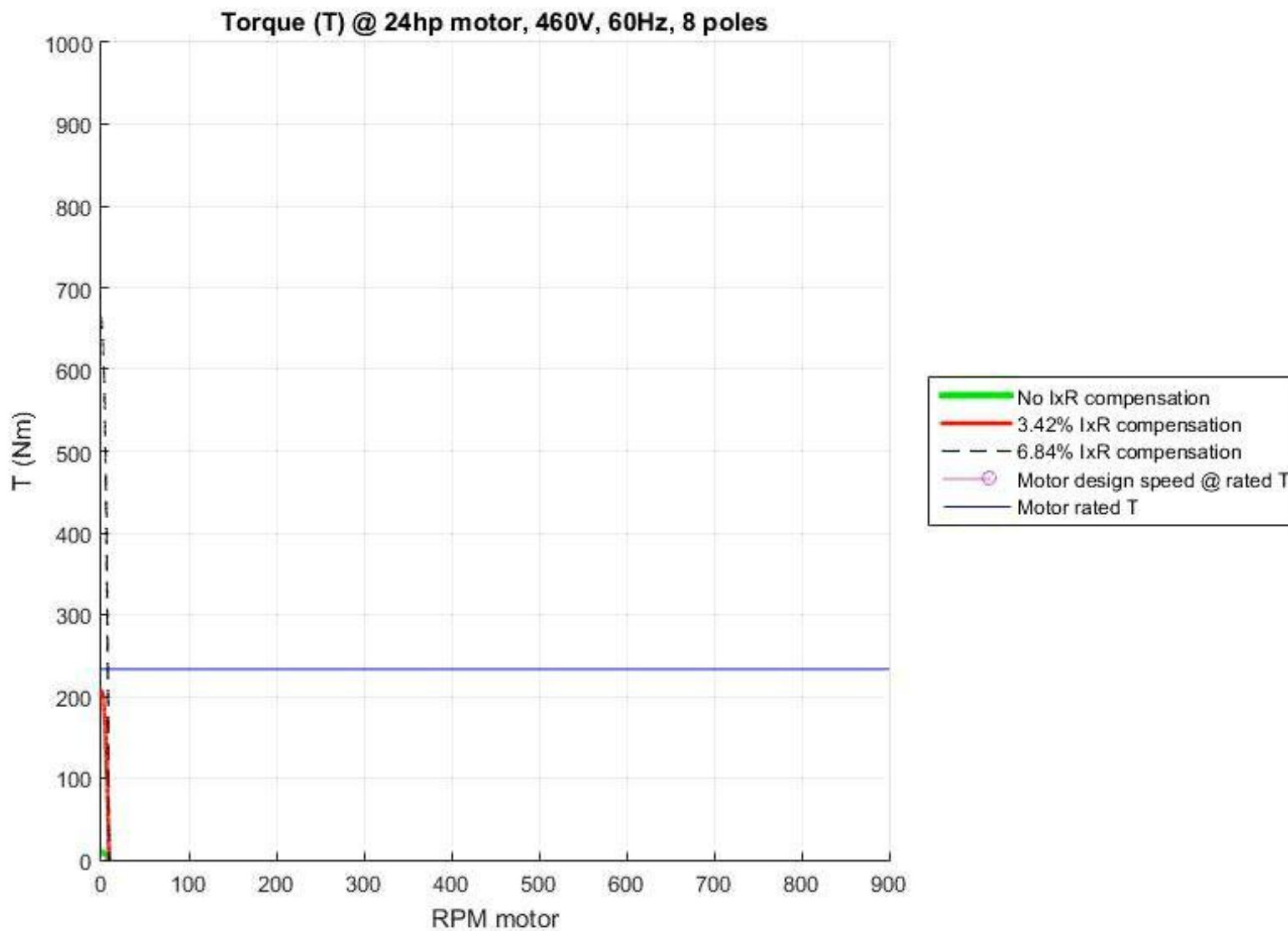


Без $I \times R$



3 $I \times R$

Починаючи з приводу: робоча



Мінімальна робоча частота

ПРИКЛАД:

4-полюсний двигун: 50 Гц, 1425 об/хв:
Ковзання: $n_{SL} = (1500 - 1425) \text{ об/хв} = 75 \text{ об/хв} (5 \%)$

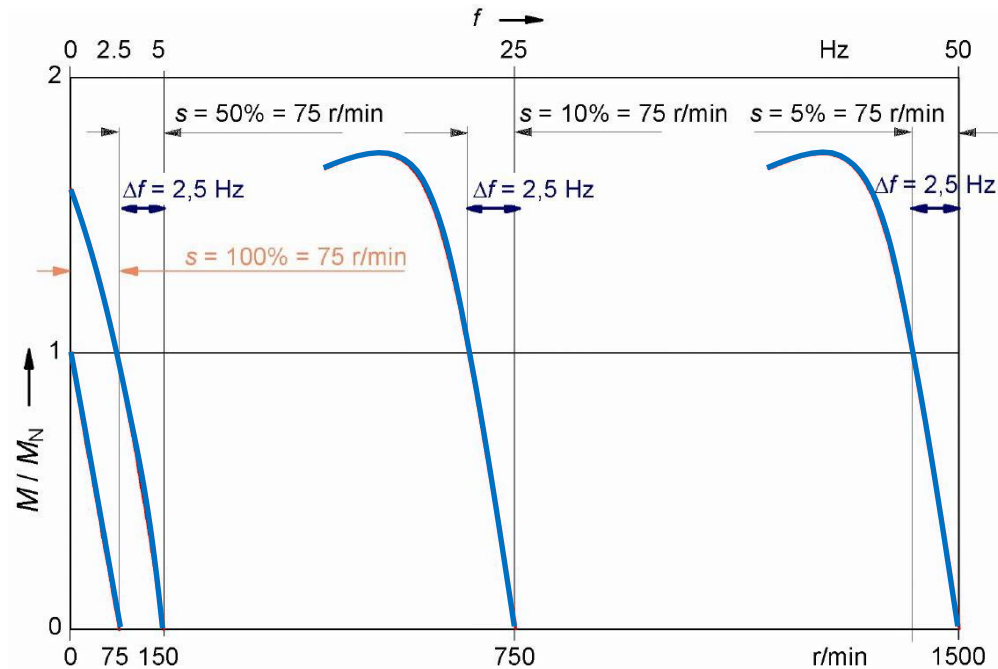
Частота ковзання: 2,5 Гц.

Синхронна швидкість :

$$n_{sy} = 60 \cdot f / p = 60 \cdot 2,5 / 2 = 75 \text{ об/хв}$$

Асинхронна швидкість:

$$n = n_{sy} - n_{SL} = 75 - 75 = 0 \text{ об/хв}$$

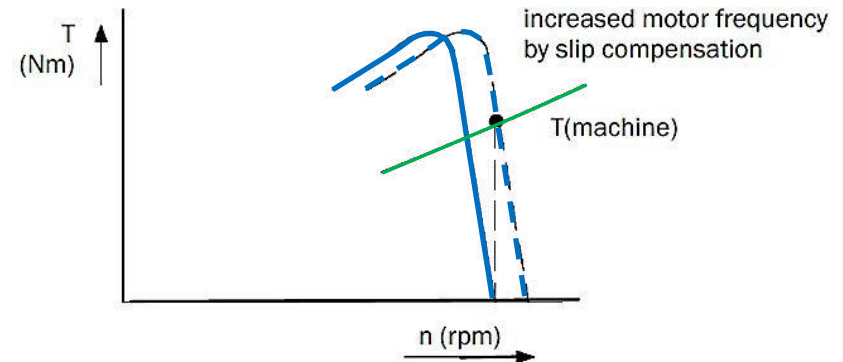
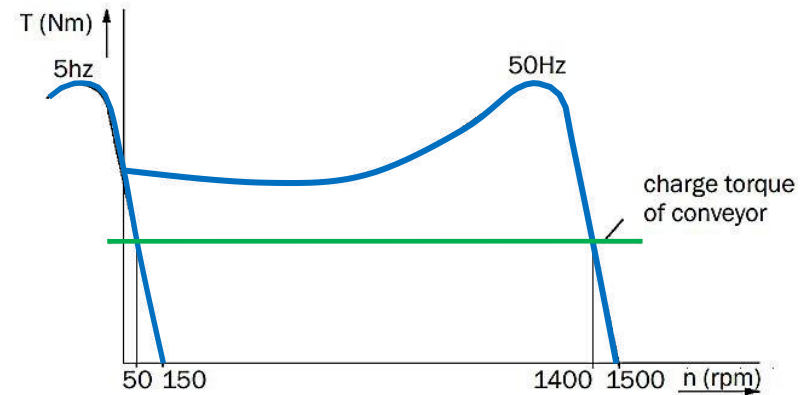
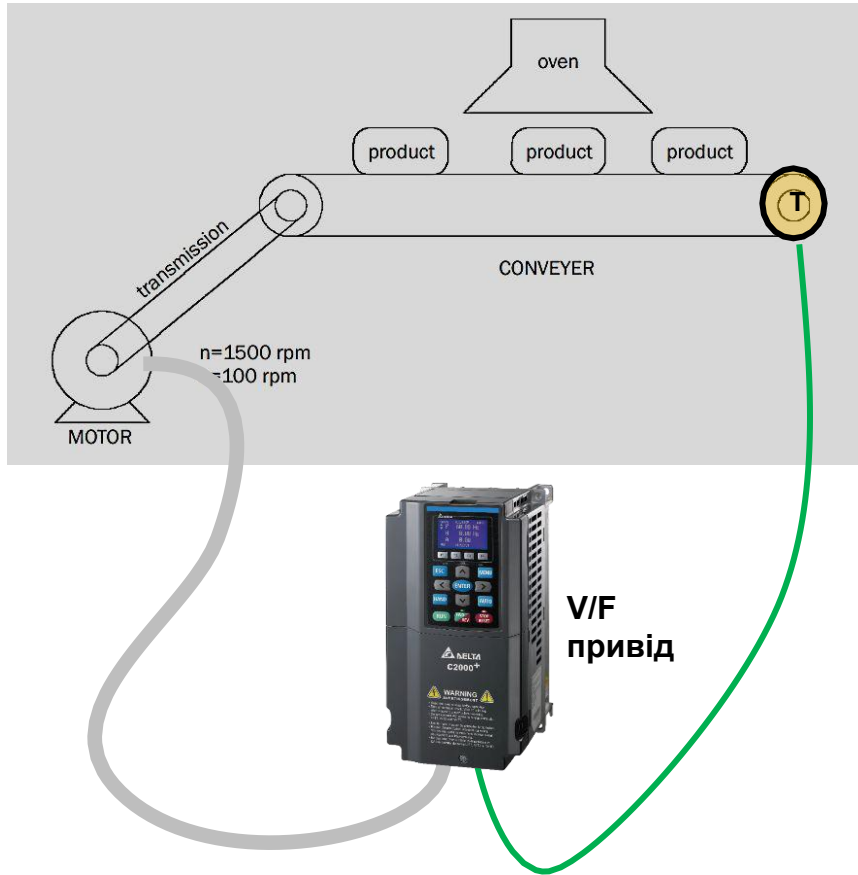


ПРИМІТКА:

При частоті 2,5 Гц двигун створює номінальний крутний момент із заблокованим ротором (з оптимальною компенсацією $I_x R$). На практиці частота повинна бути вище 2,5 Гц.

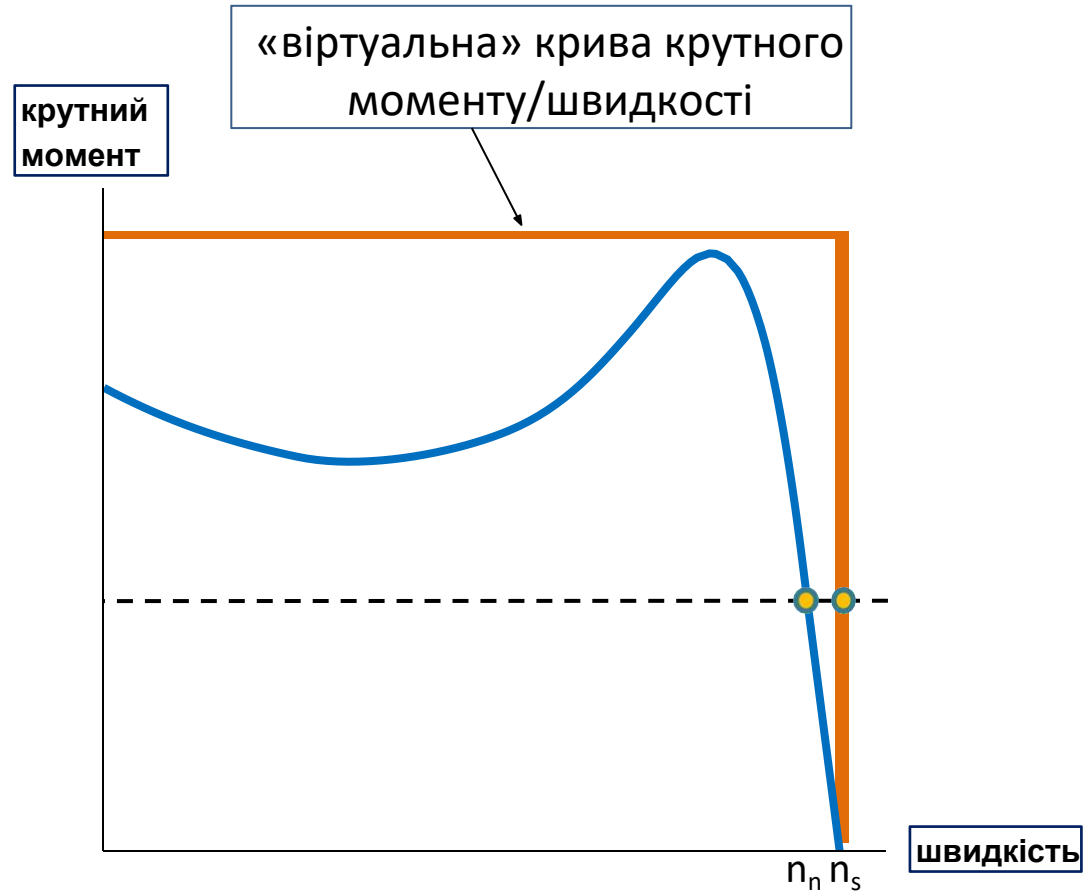
Автоматична компенсація ковзання збільшить швидкість, рівну швидкості ковзання.

V/f привод із зворотним зв'язком тахо (ПІД-контроль).



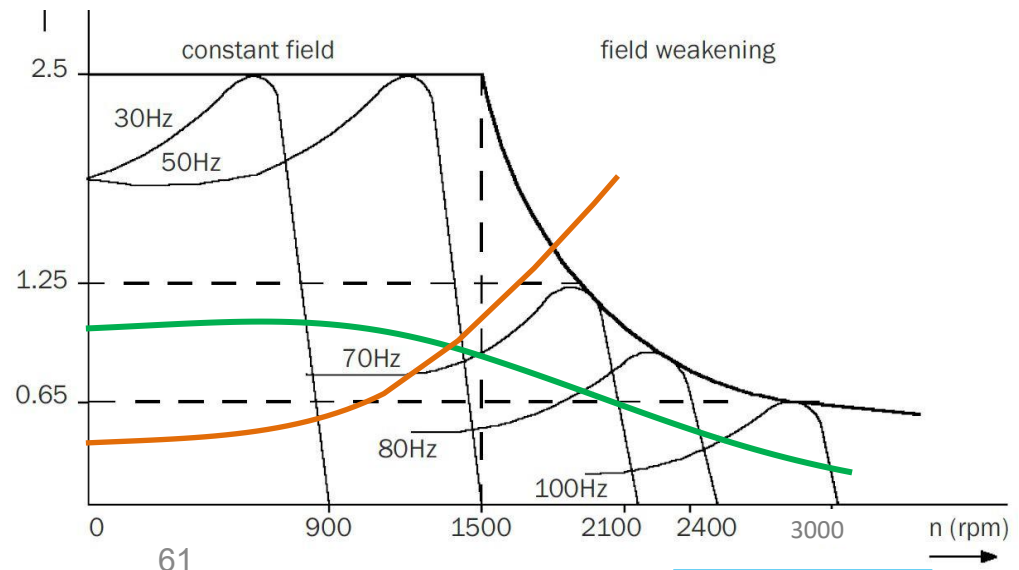
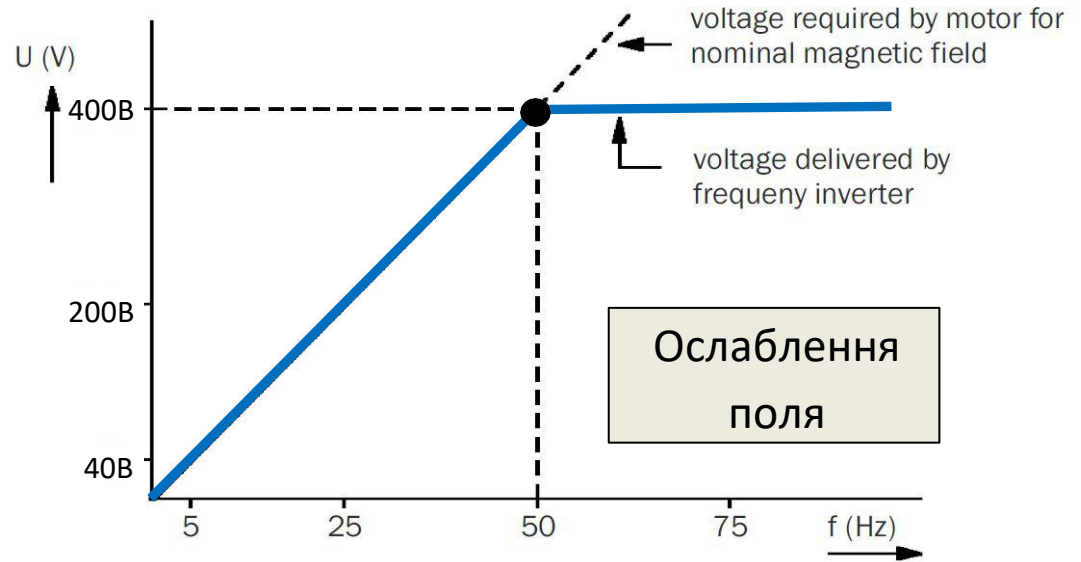
Властивості двигуна: ковзання (прямий привід крутного моменту)

- Коли двигун змінного струму використовується з приводом з прямим керуванням крутним моментом, швидкість потоку автоматично компенсується швидкістю ковзання.
- Це також означає **МАКСИМАЛЬНИЙ** крутний момент на нульовій швидкості!
- Ми могли б сказати, що цей привід здатний надати асинхронному двигуну поведінку **синхронного** двигуна.

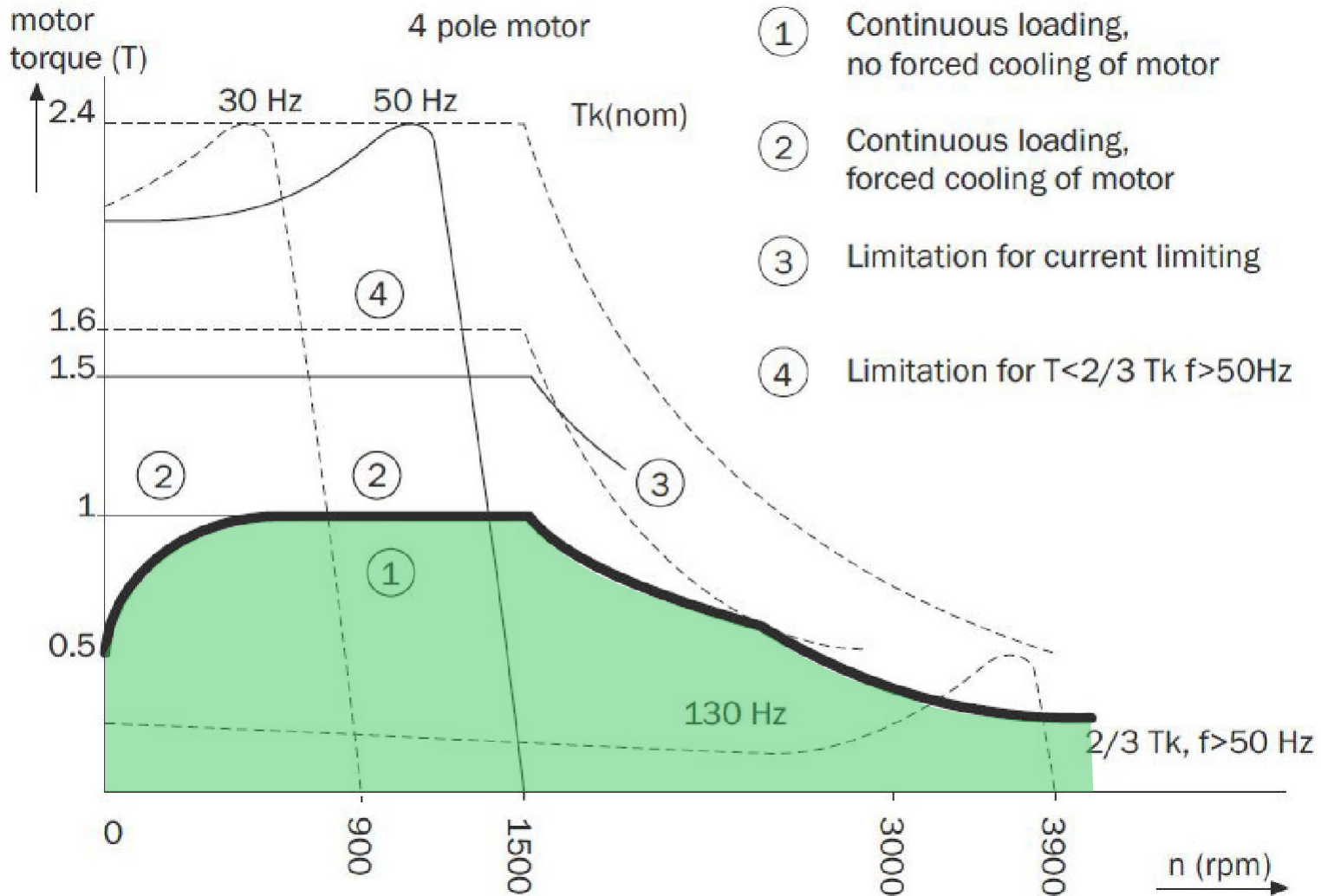


Експлуатація > Номінальна швидкість: ослаблення поля

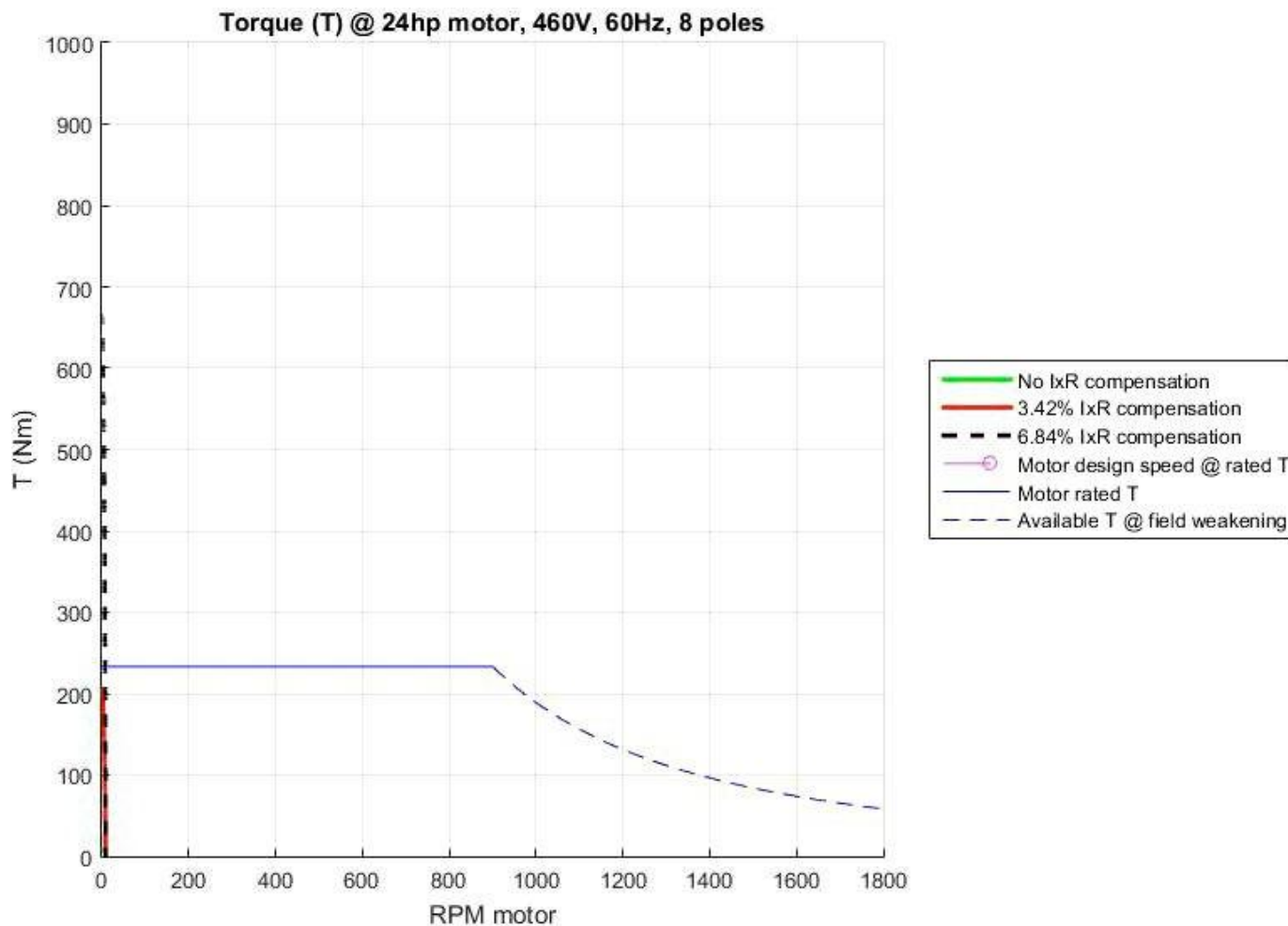
- Коли швидкість приводу перевищує номінальну, співвідношення В/Гц падає. Магнітне поле зменшиться
- Залежно від кривої крутного моменту/швидкості програми можна керувати двигуном
- Приклад застосування постійної потужності (верстат, моталка)



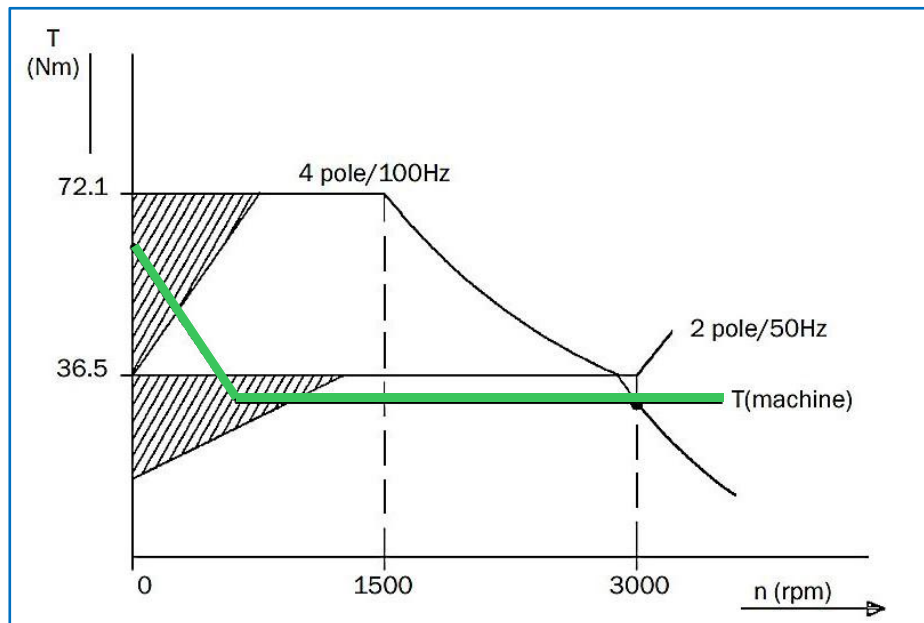
Діапазон регулювання двигуна з приводом



Починаючи з приводу: робоча точка

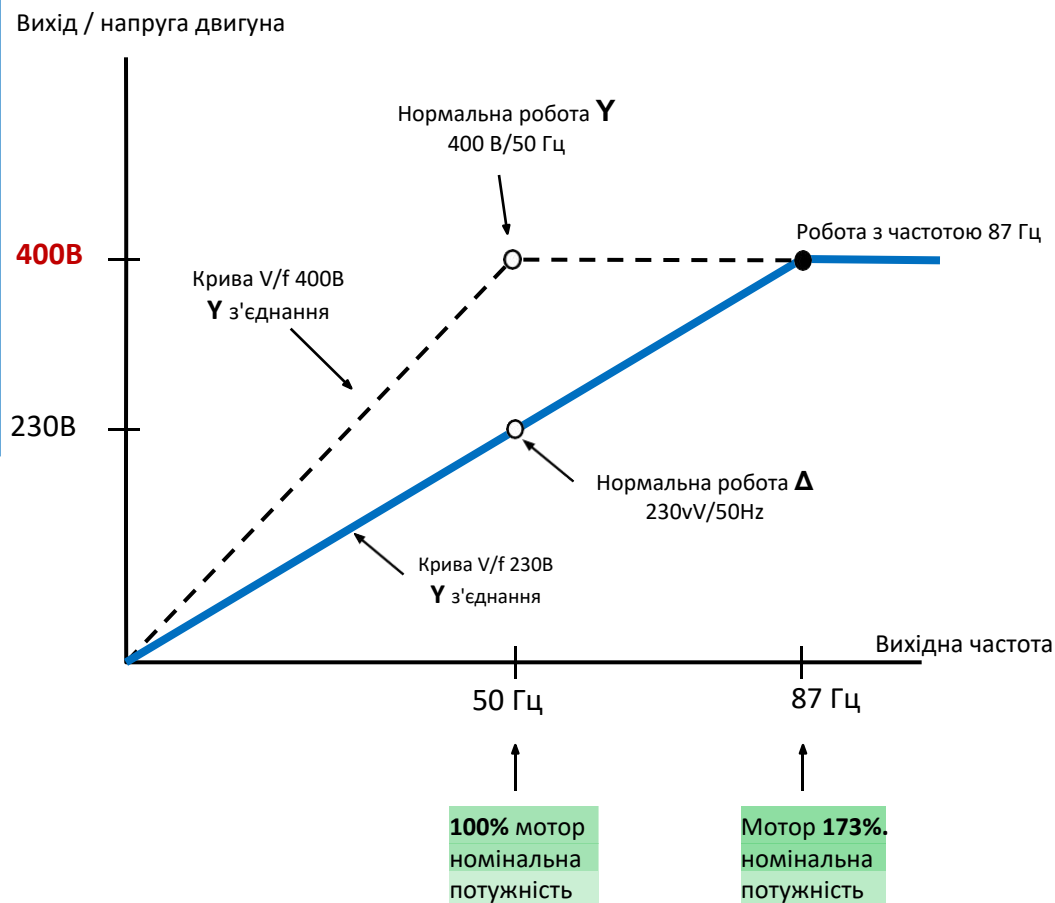


- Приклад: застосування: постійний крутний момент 10 кВт, високий пусковий момент
- 2-полюсний двигун має проблеми з пусковим моментом і охолодженням на низькій швидкості
- 4-полюсний двигун має 2-кратний крутний момент при запуску
- Розмір накопичувача той самий



syn-chronous n rpm	dimension	P_{nom} kW	n_{nom} rpm	output	$\cos \phi$	I_{nom} at 380V A	$\frac{I_a}{I_n}$	$\frac{T_a}{T_n}$	$\frac{T_z}{T_n}$	$\frac{T_k}{T_n}$	moment of mass inertia kgm ²
3000	ZK 132 SK2	5,5	2860	85	0,91	10,8	6	2,4	2,1	2,7	0,020
	ZK 160 MK2	11	2890	87	0,90	21,4	6,2	2,6	2,2	2,8	0,040
	ZK 160 M2	15	2910	88	0,91	28,4	7,2	2,6	2,1	3,2	0,050
1500	ZK 132 SK2	4	1420	83	0,83	8,8	6,2	2,4	2	2,8	0,0135
	ZK 160 M4	11	1455	89	0,89	22,4	6	2,5	2,2	2,5	0,073

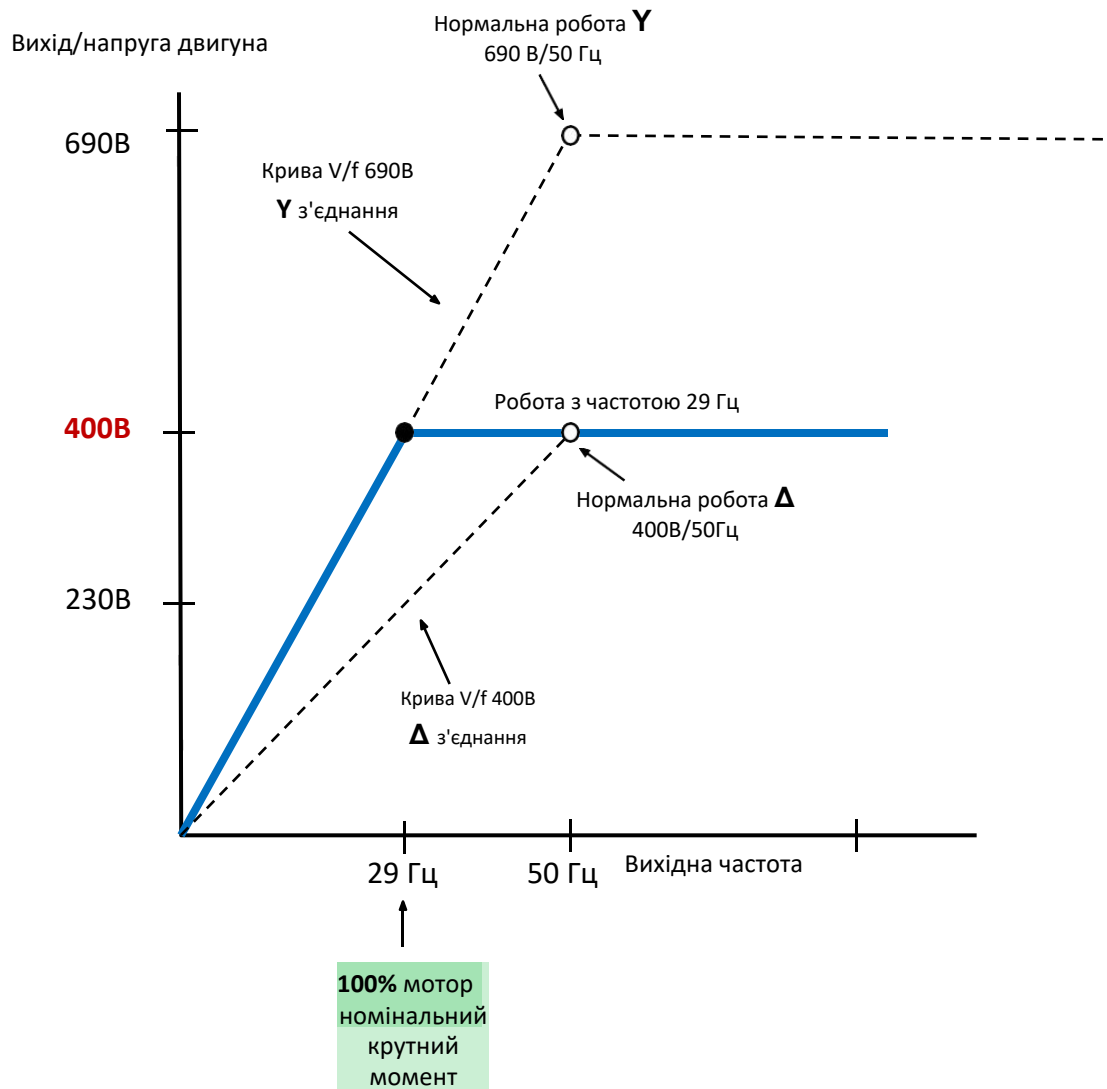
- Увімкніть двигун при нижчій напрузі, наприклад 230 В
- Напруга живлення 400В В/ Гц буде постійним до 87 Гц
- **КРУТНИЙ МОМЕНТ** буде постійним
- Потужність збільшиться на 173% ($\sqrt{3}$)
- Струм підніметься на 173%!
- Зверніть увагу, що напруга ізоляції двигуна повинна витримувати напругу 400 В!



Робота з частотою 29 Гц і двигуном 400/690 В



- Увімкніть двигун при вищій напрузі, наприклад 690 В
- Напруга живлення 400В
- В/Гц буде постійним до 29 Гц
- КРУТНИЙ МОМЕНТ буде постійним
- Насос із низькою швидкістю застосування (див. програми)

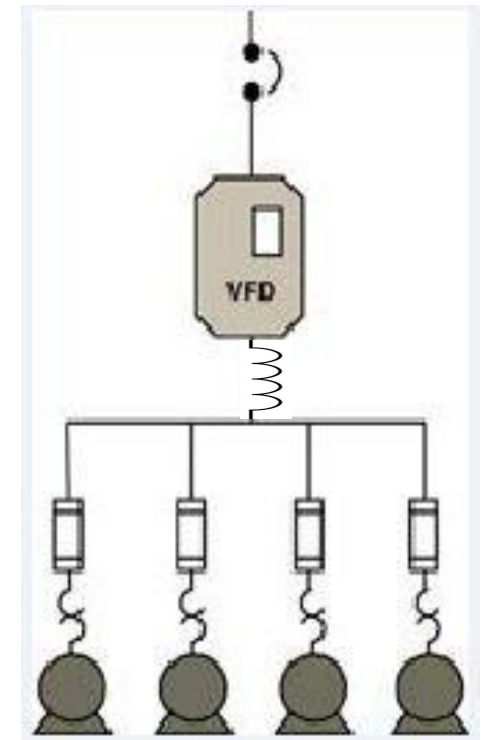


- Можливо тільки з приводом V/f (модулятор В/Гц)
- Особлива увага на компенсацію $I \times R$, оптимізацію потоку, контроль крутного моменту тощо. Ці функції розроблені для роботи одного двигуна і можуть працювати належним чином, лише якщо всі двигуни однакові та мають однакові навантаження!
- Загальний струм двигуна ніколи не перевищує струм приводу
- Необхідний індивідуальний захист двигуна
- Вихідна котушка потрібна для довгих кабелів двигуна. Усі кабелі проходять паралельно
- Налаштування двигуна:

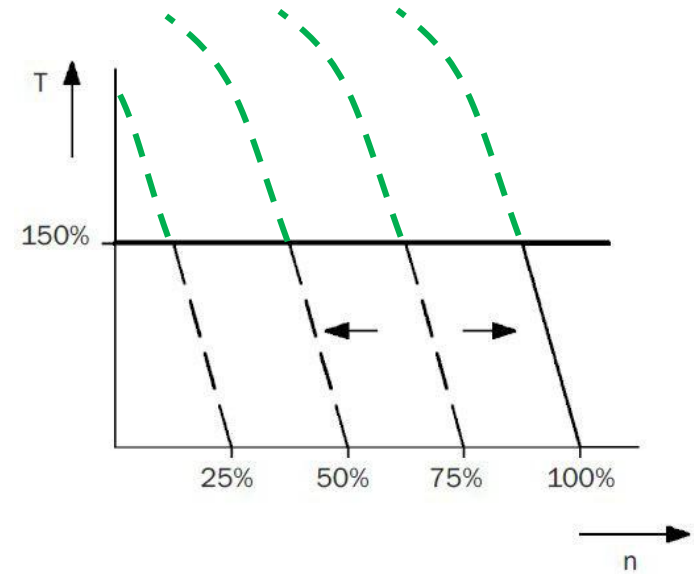
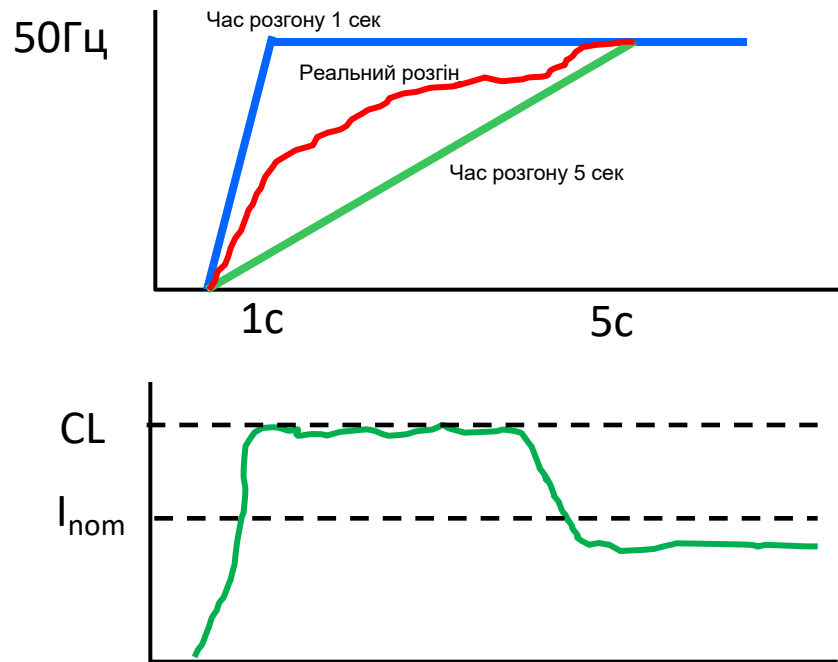
Потужність і струм > додати

Напруга і частота > те саме

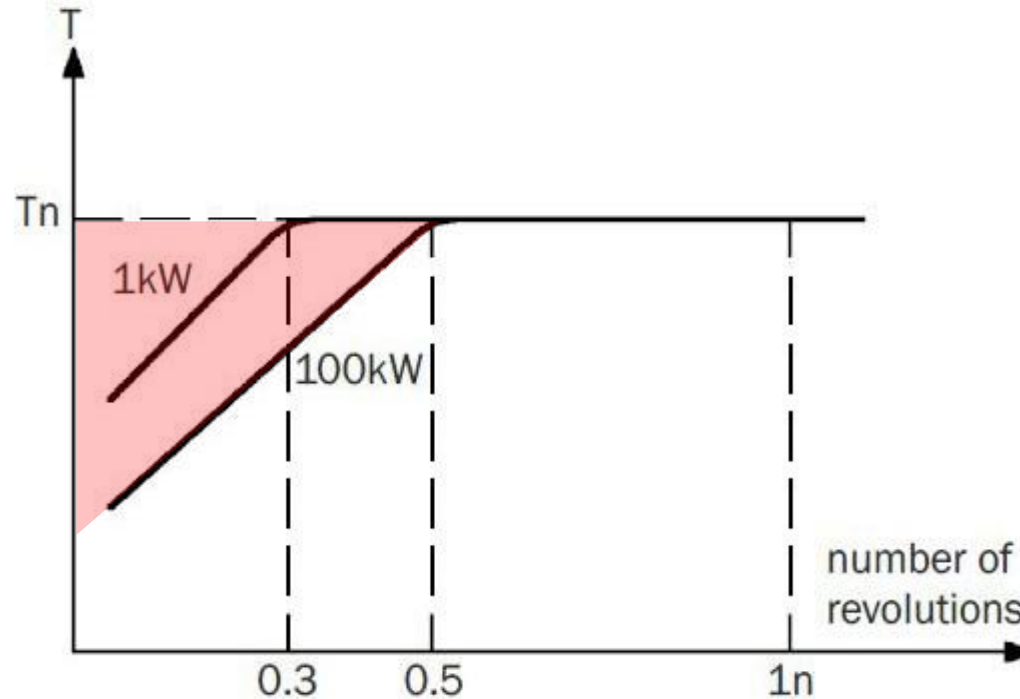
$\cos \phi$ і швидкість > середній



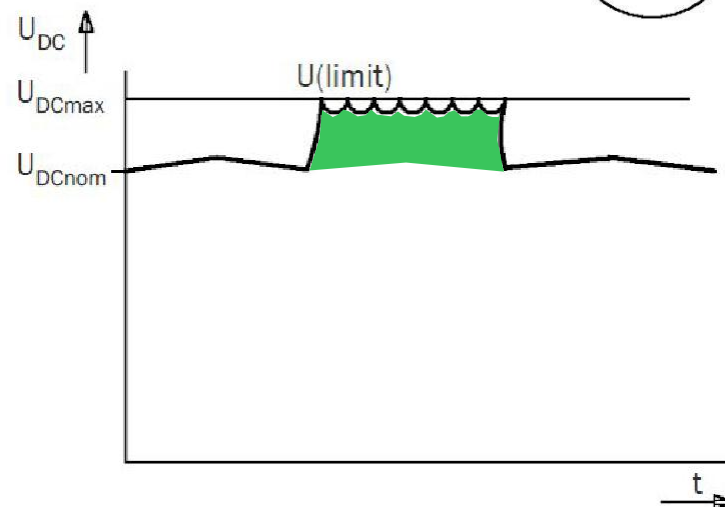
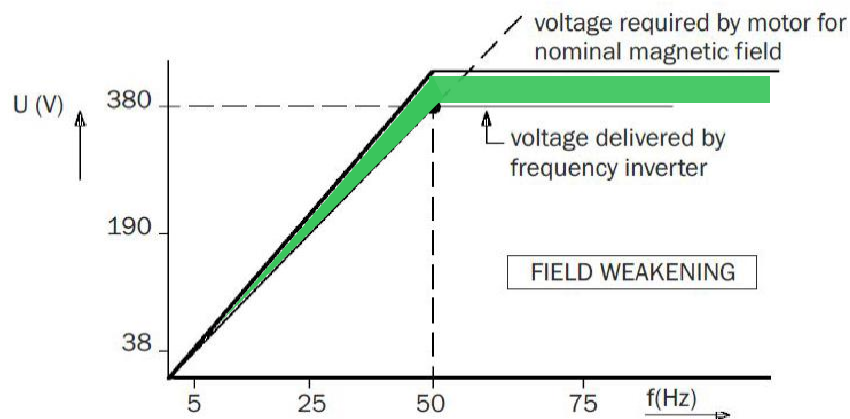
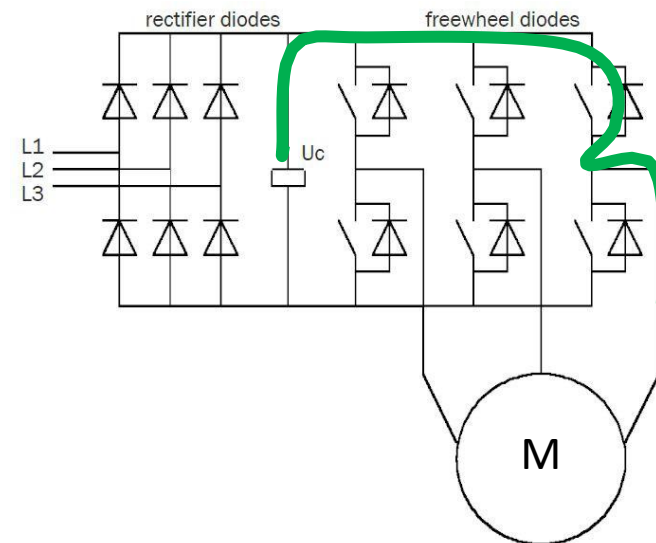
- Обмеження струму є активним контуром
- Це ЗМЕНШУЄ швидкість до повної зупинки
- Не варто скорочувати час прискорення



- Залежить від швидкості та застосування
- Якщо низька швидкість і високий крутний момент, то примусове охолодження



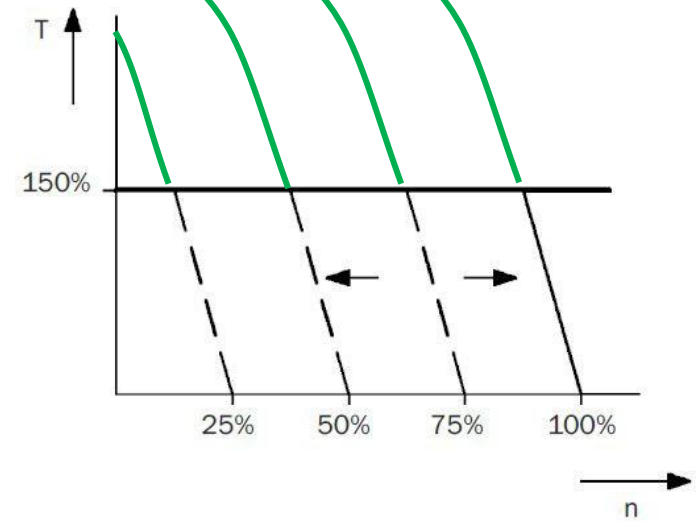
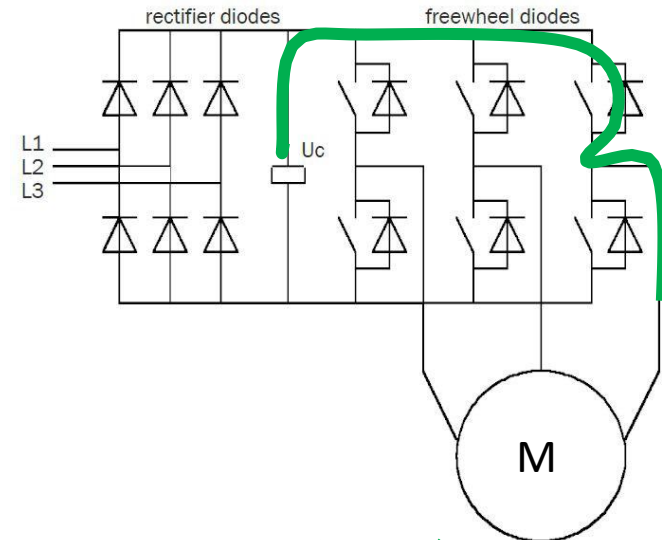
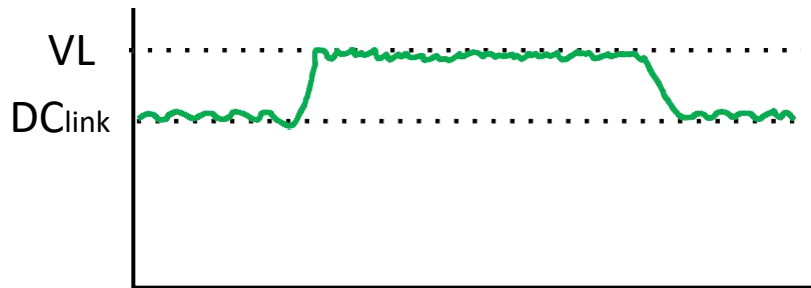
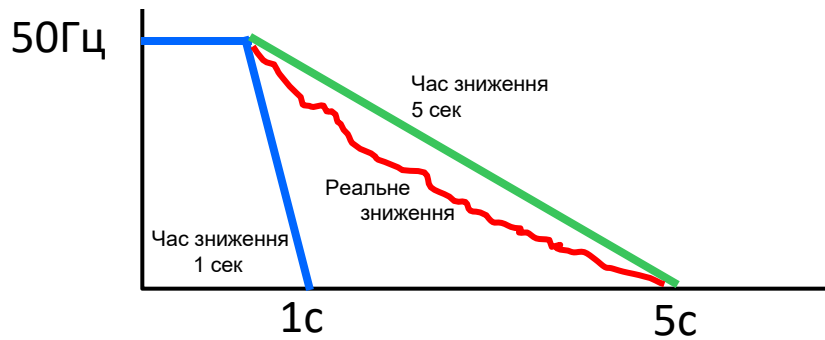
- Зворотний струм протікає через діоди вільного ходу в ланці постійного струму, якщо двигун сповільнюється або якщо машина генерує електроенергію (кран, ліфт)
- Напруга ланцюга постійного струму також збільшить напругу двигуна, що дасть додаткову **потужність гальмування** в середньому на 5-10% від номінальної потужності



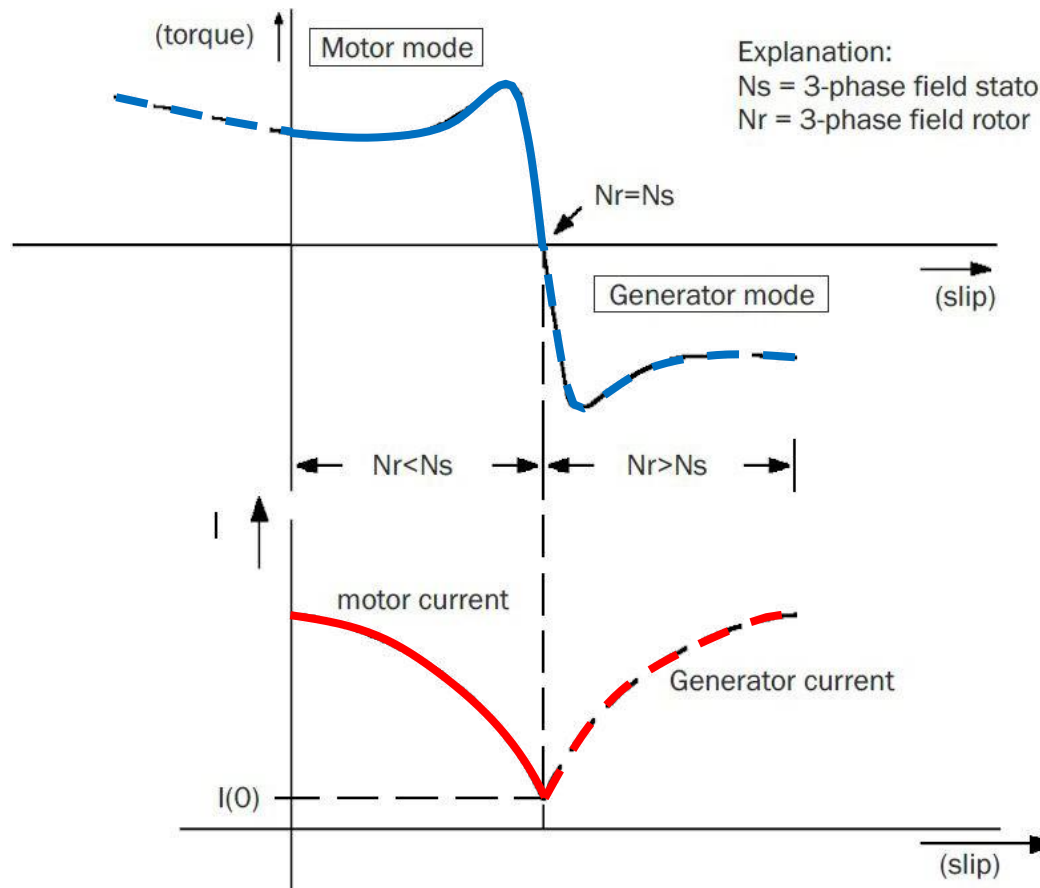
Обмеження напруги



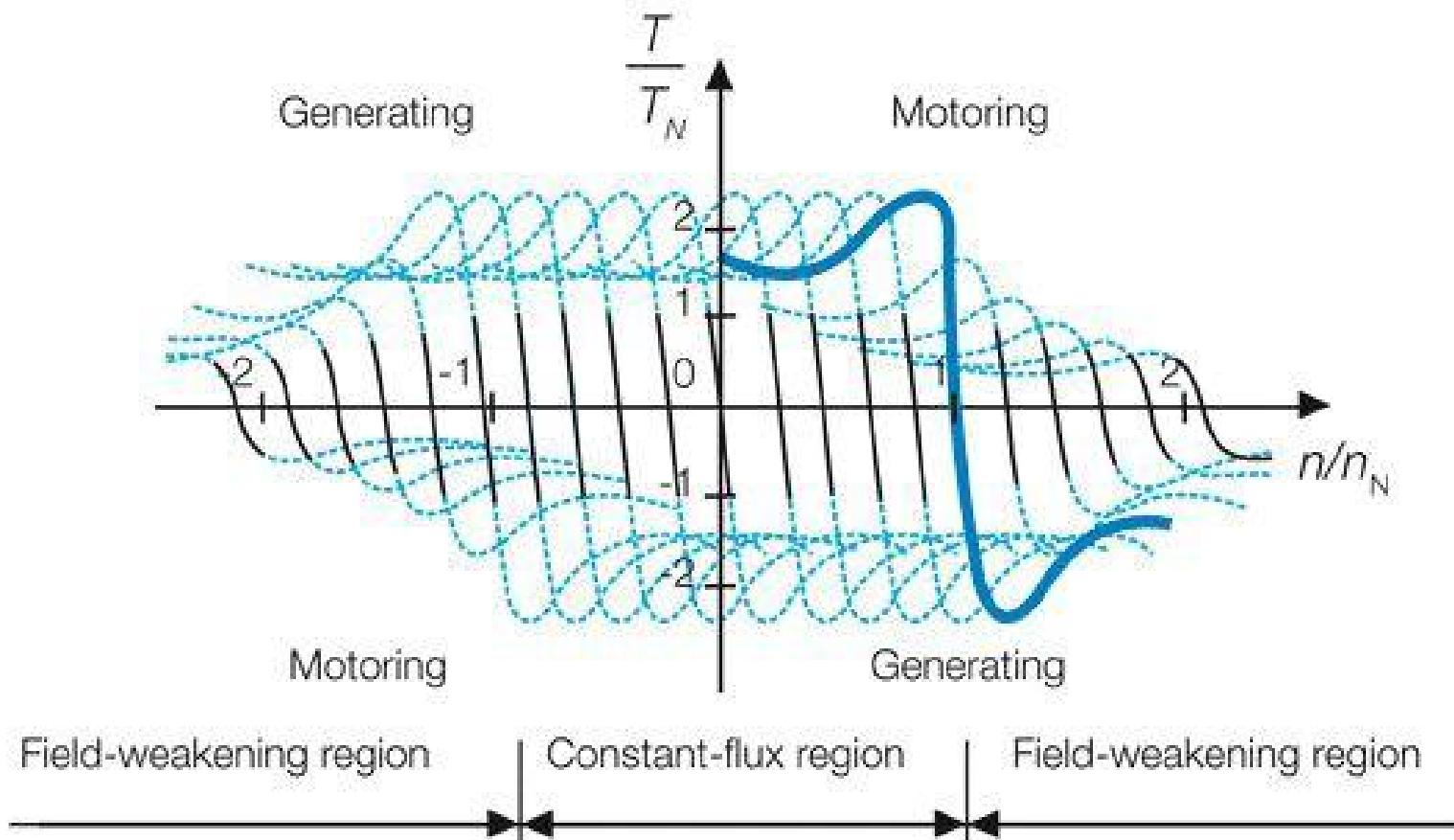
- Межа напруги - це активний контур
- Він ЗБІЛЬШУЄ швидкість до максимального ліміту
- Не варто скорочувати час уповільнення
- Використовуйте векторне гальмо або гальмівний блок



- Стандартний привід працює тільки в 2 квадрантах. Швидкість двигуна в 2 напрямках: за годинниковою стрілкою / проти годинникової стрілки
- Привід може мати дуже коротку гальмівну здатність (не повний 4-квадрант)
- Немає зворотного струму в мережу

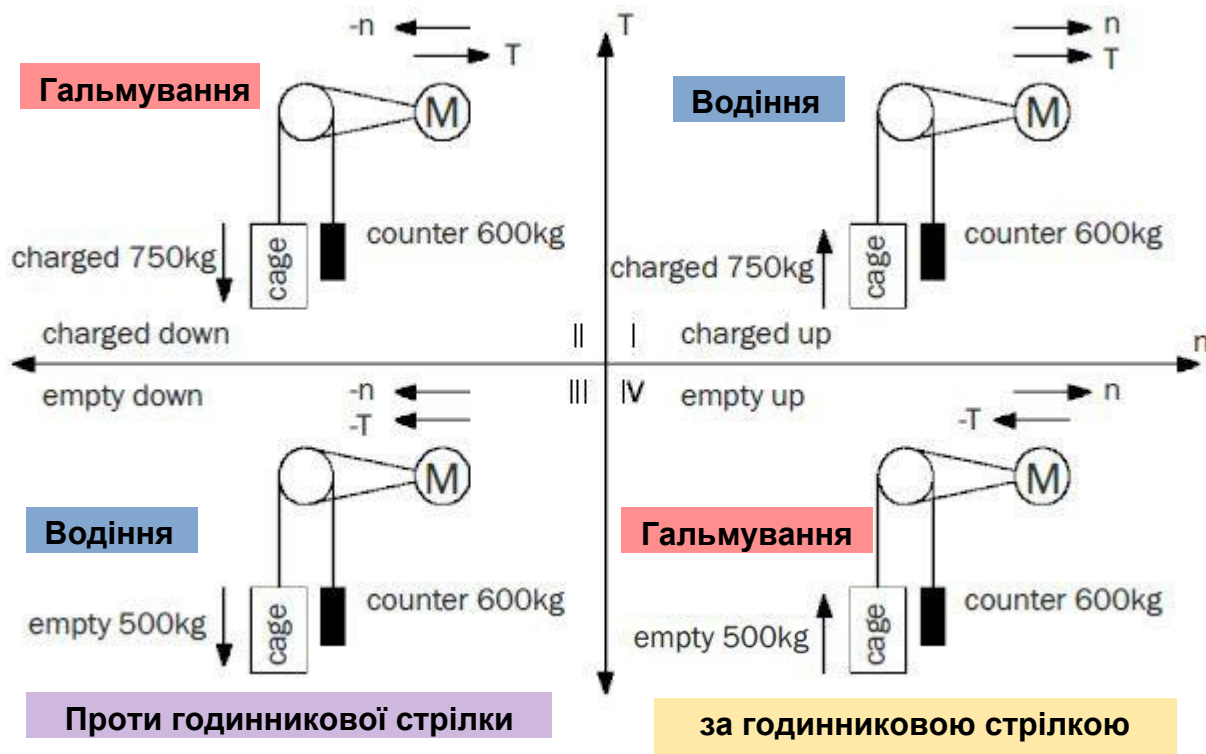


- 4 Квадрант означає повну роботу двигуна в обох напрямках швидкості і:
- Він має повну безперервну роботу генерації (гальмування) Відсутність зворотного струму в мережі

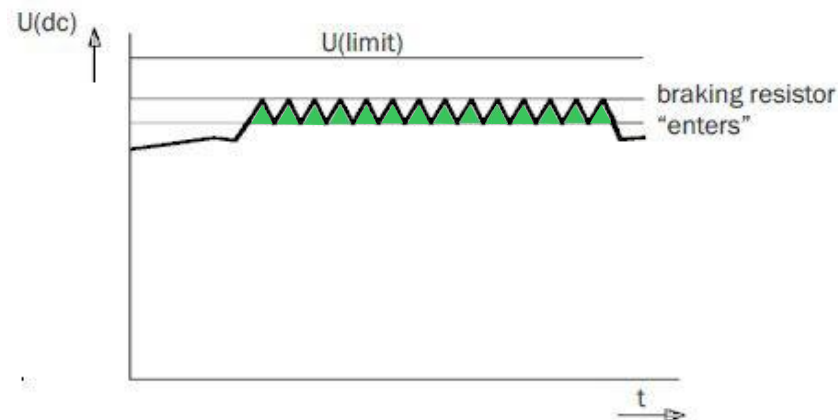
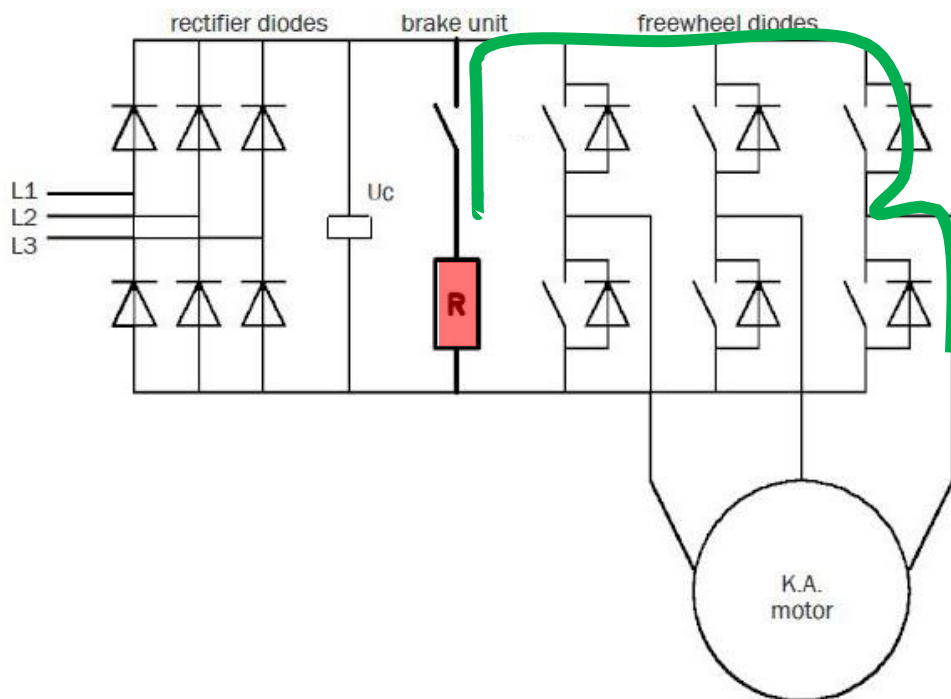


Необхідна 100% гальмівна здатність:

- З гальмівним чоппером або активною передньою частиною (AFE)
- Наприклад, ліфт піднімається і спускається



- Енергія гальмування може розсіюватися на зовнішньому резисторі. Це варіант
- Один додатковий IGBT вбудований в накопичувач, резистор встановлений зовні
- Можлива 100% гальмівна потужність

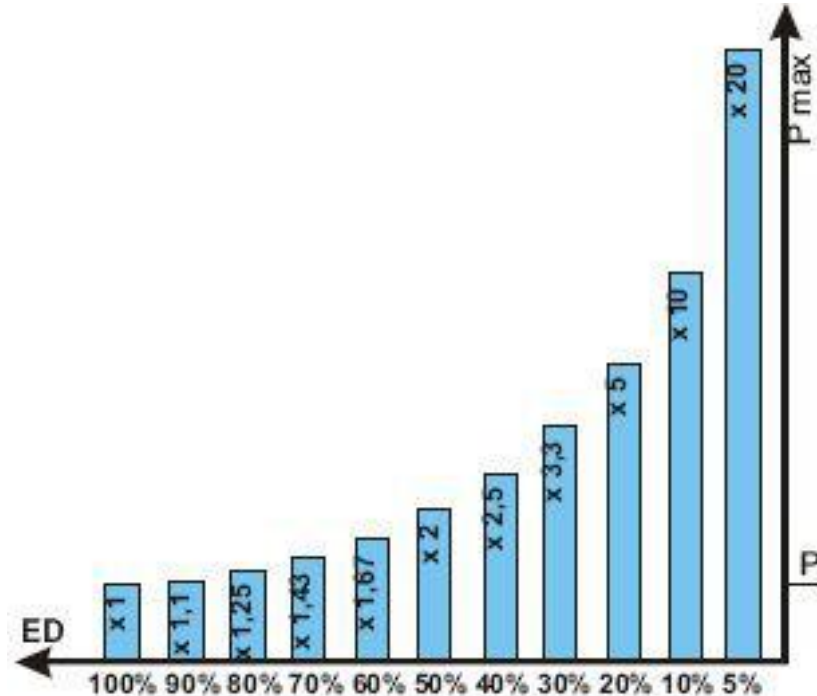
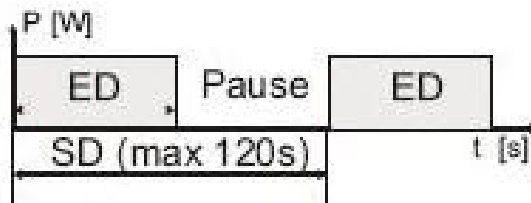


- Гальмівний резистор вибирається залежно від робочого циклу системи. Отже, якщо він «вимкнений», він може охолонути.
- Омічне значення залежить від максимального струму IGBT в приводі

$$P_{max} = \frac{P \times 100}{ED [\%]}$$

$$ED\% = \frac{ED[s]}{SD[s]} \times 100$$

Where ED = Duty Cycle
SD = Cycle time



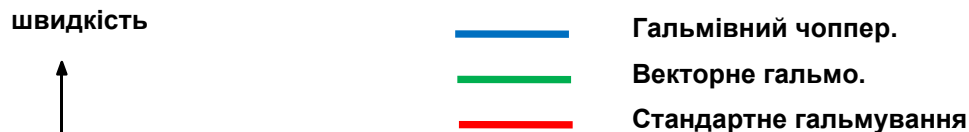
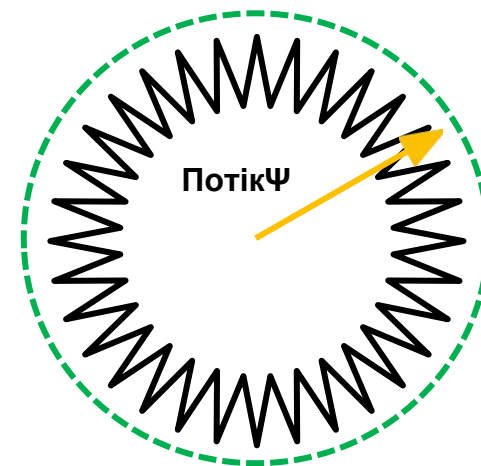
ПРИКЛАД:

- ED становить 65 % від 8 кВт = 5,2 кВт протягом 2 секунд → 5,2 кВт з ED < 5 % → коефіцієнт використання 20
- Виберіть резистор $5,2/20 = 260$ Вт для 100 % ED (або 5,2 кВт 5 % ED)

Внутрішнє гальмування «MOTOR FLUX».

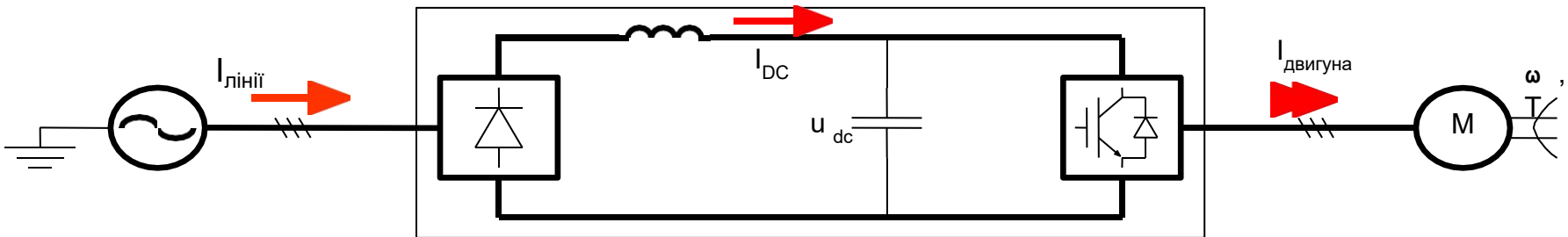


- Це генерує спеціальний шаблон модуляції, який збільшує втрати двигуна
- До 30-40% гальмівної потужності без опцій
- Захист двигуна важливий: енергія розсіюється в статорі, тому використовуйте захист PTC в двигуні

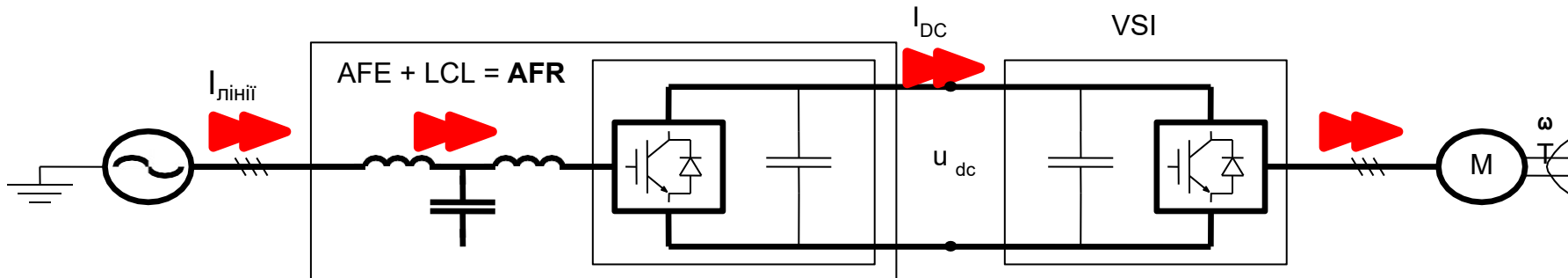


- Це рішення Back to Back для 100% гальмівного струму в мережі
- Повна робота 4 Q, 100% зворотний зв'язок живлення з мережею.
- Також для НИЗЬКИХ гармонік THDI < 5% синусоїдального вхідного струму

DFE = передній кінець діода



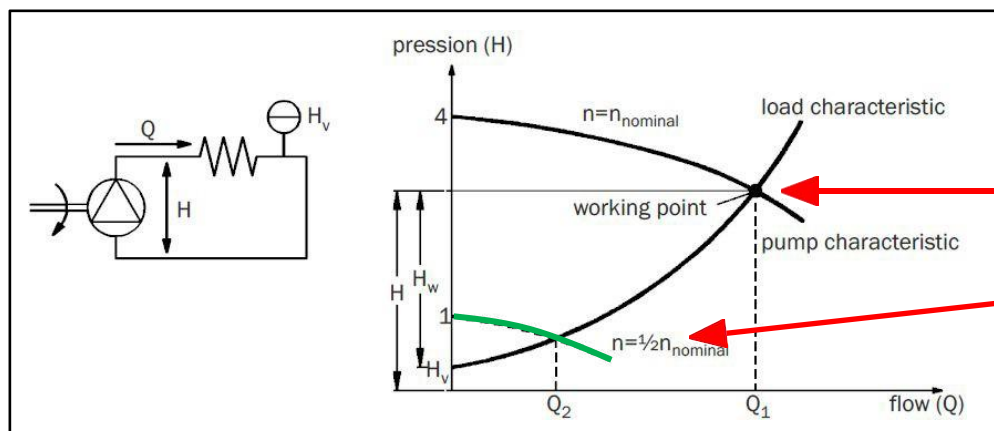
AFE = активний інтерфейс



Контроль витрати на насосі

$H \approx n^2$ Тиск у квадраті до швидкості

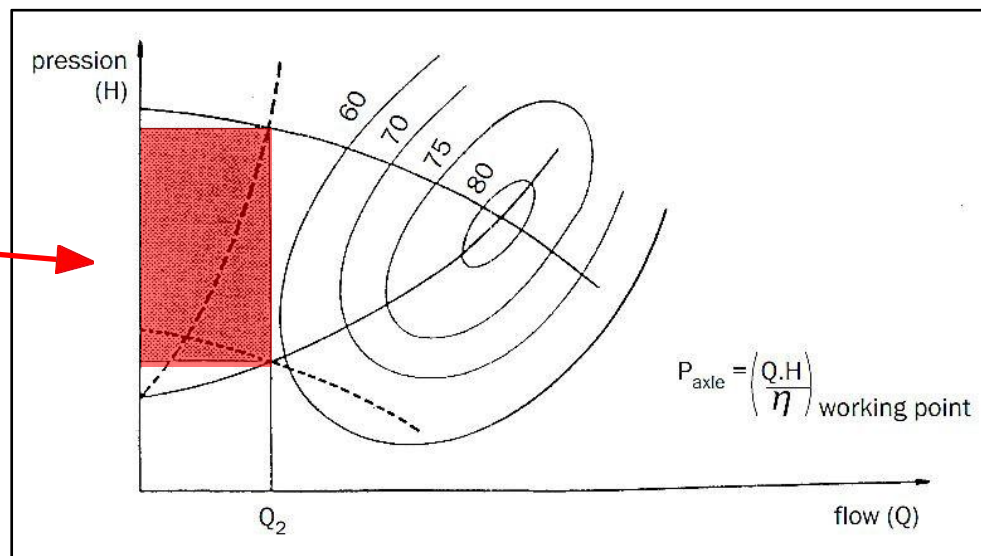
$Q \approx n$ Потік лінійний зі швидкістю



Q1 на повній швидкості

Q2 працює на швидкості 50%.

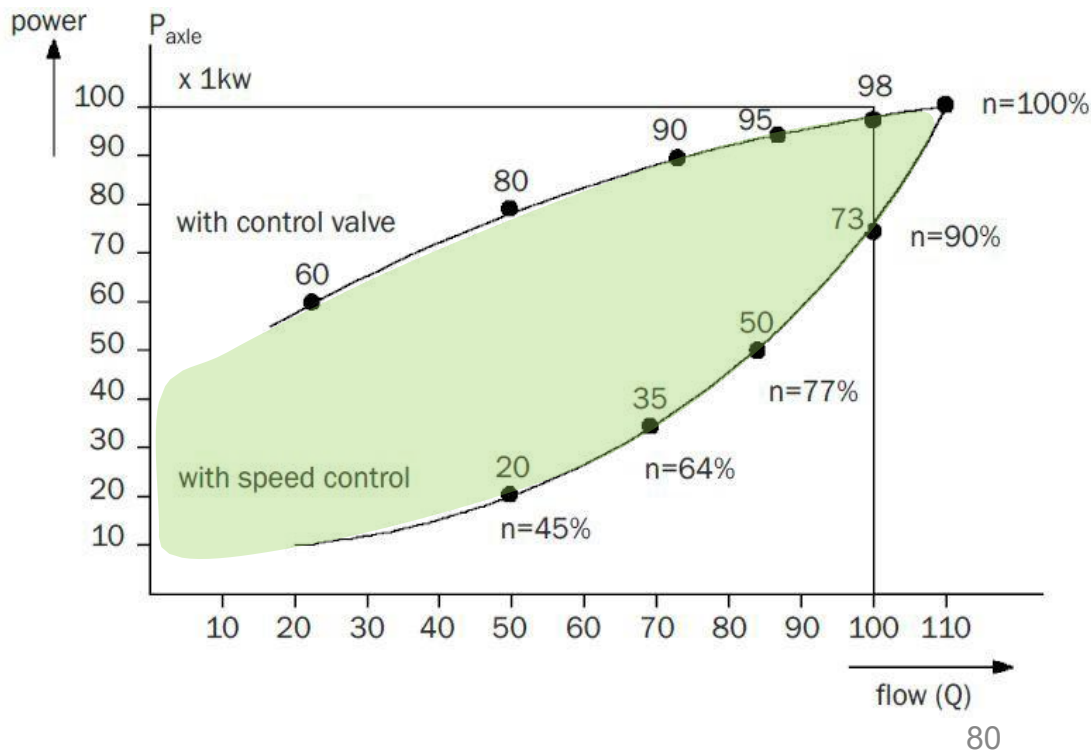
Непотрібний тиск (потужність) для підтримки того самого потоку



- Насос потужністю 100 кВт на рік роботи
- Економія 693-408 = **285 МВт*год**

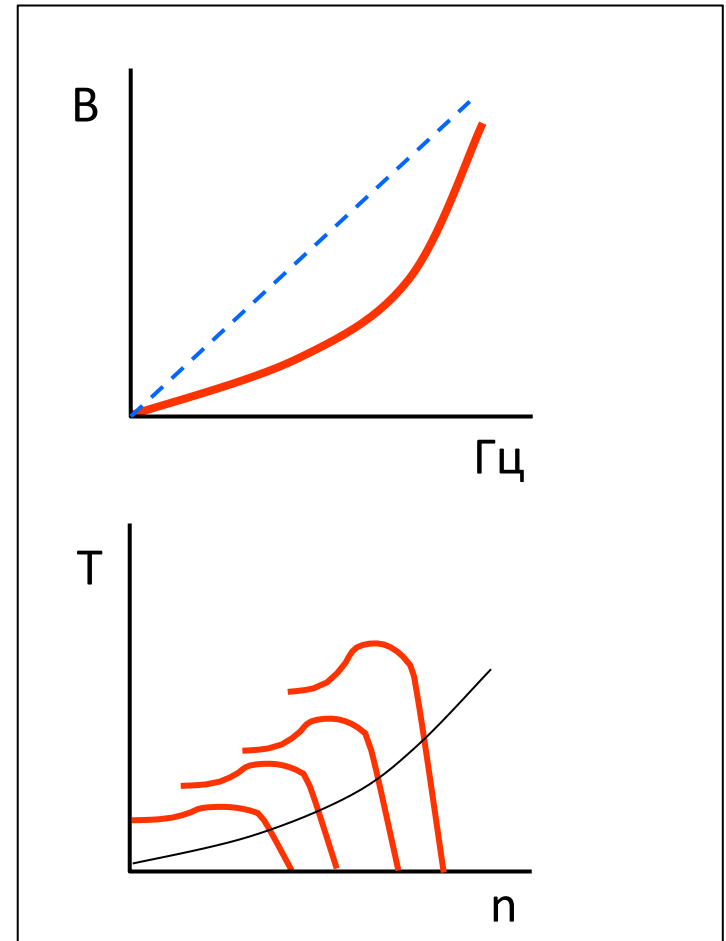
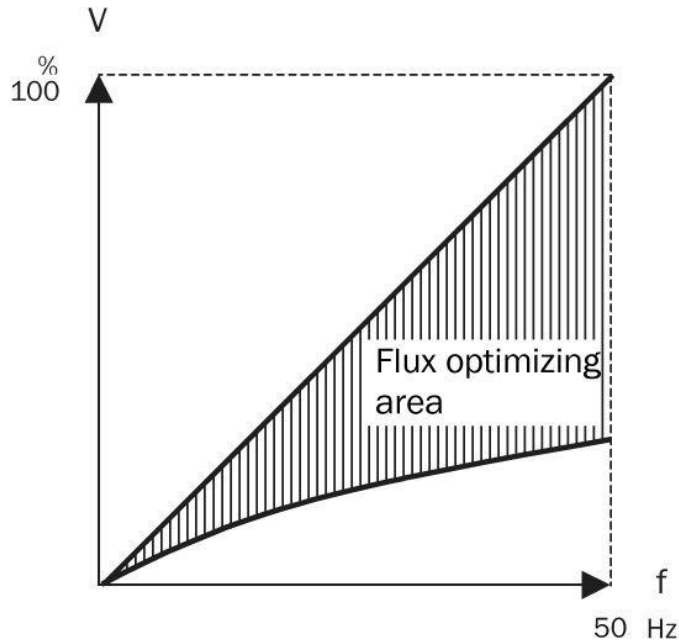
		контрольний клапан				регульований привід			
Q	години / рік	Pa (кВт)	η	Pe (кВт)	кВт*год x 1000	Pa (кВт)	η	Pe (кВт)	кВт*год x 1000
100%	2000	98	0,94	105	209	73	0,90	81	162
85%	3000	95	0,94	101	303	50	0,86	58	174
70%	1000	90	0,94	96	96	35	0,80	44	44
50%	1000	80	0,94	85	85	20	0,70	28	28
	7000				693				408

- Якщо 1 кВт-год = 0,20 євро: економія: 57 000 євро



Автоматично регулює значення В/Гц залежно від навантаження.

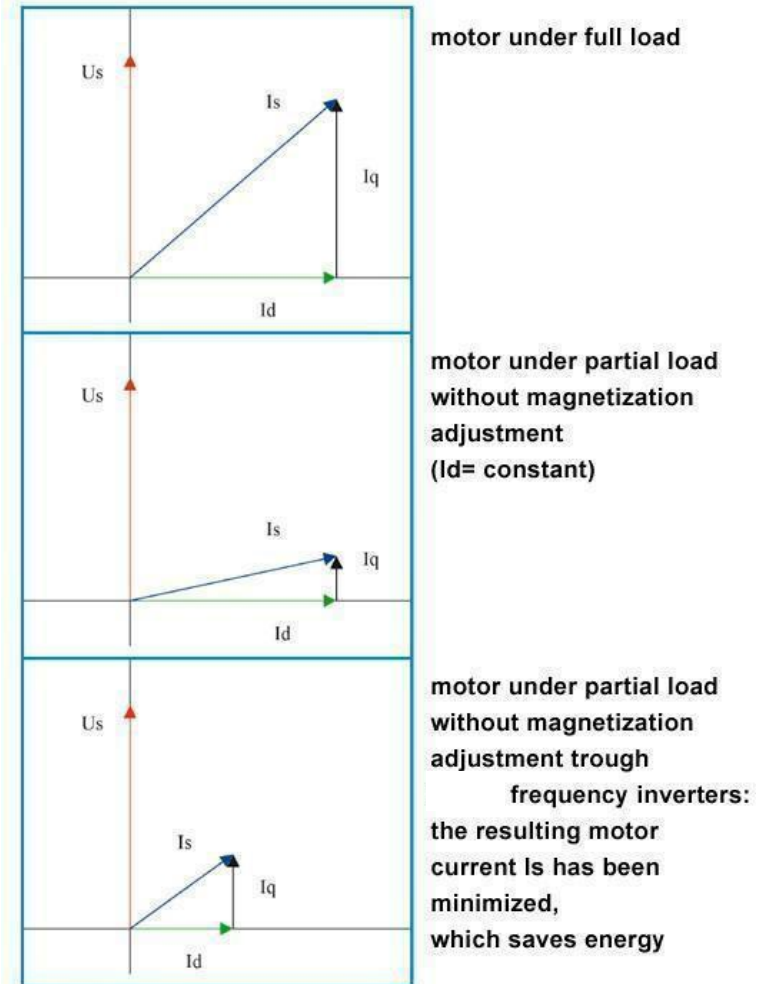
- З меншим навантаженням менше чутного шуму та менших втрат
- Підходить для низькодинамічних додатків.



Оптимізація потоку



- Вентилятори, насоси, конвеєр заощадають до 30% енергії при частковому навантаженні
- При частковому навантаженні струм холостого ходу (струм намагнічування) не обов'язково повинен бути макс.
- Найбільшу економію можна отримати при навантаженні 10-15%
- Не підходить для високодинамічних застосувань: крани, дробарки тощо.



U_s = вектор напруги двигуна
 I_s = вектор струму двигуна
 I_d = струм намагнічування
 I_q = активний струм (крутний момент)

