

Електротехнічний факультет
Кафедра електропривода



**Дисципліна: «Вентильний електропривод
загальнопромислових механізмів»**

Тиристорні регулятори напруги

Лектор: Боровик Р.О.

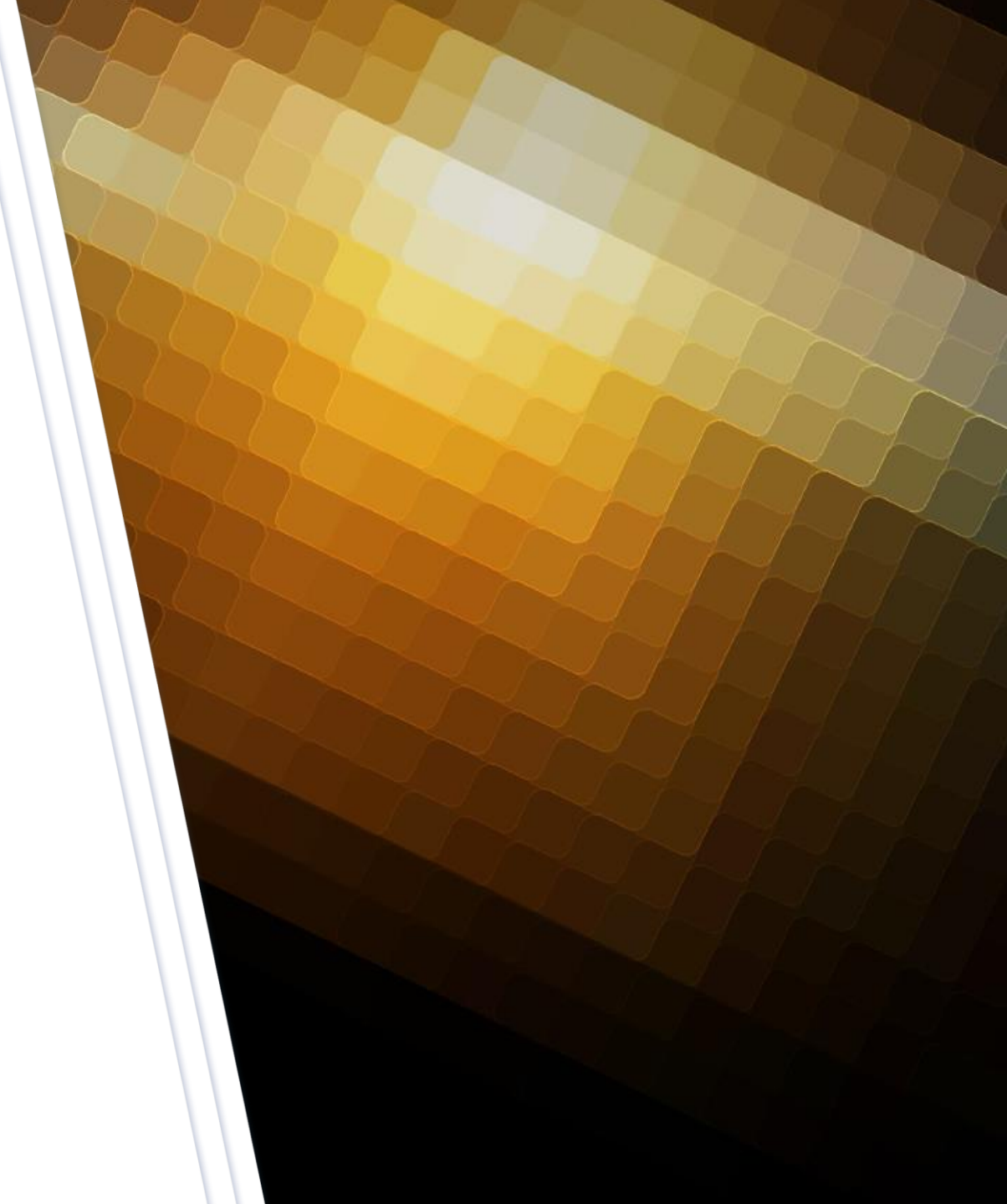
Розробники: Боровик Р.О.

Для студентів напрямів підготовки: 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

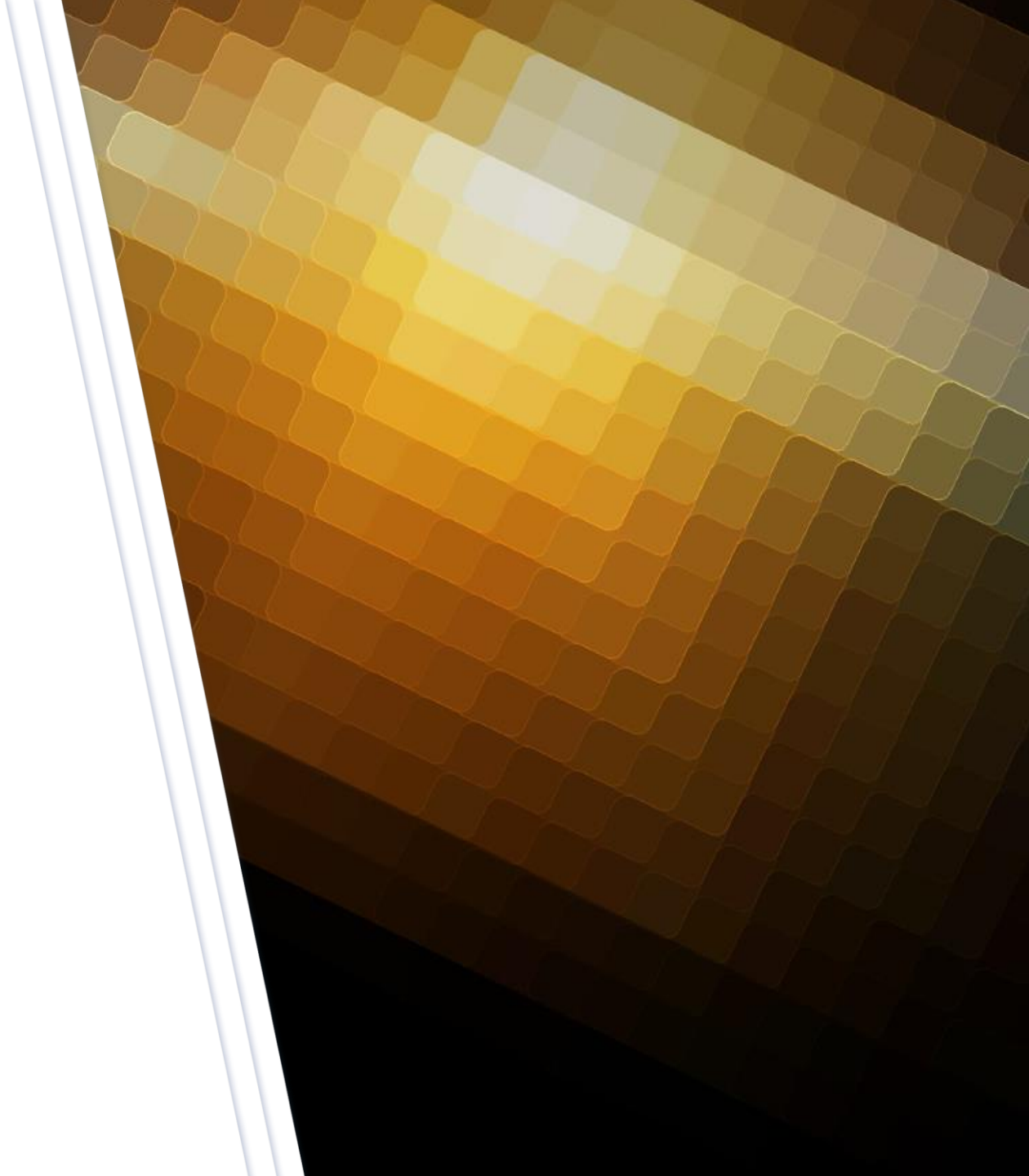
Доступне для завантаження на сайті кафедри: elprivod.nmu.org.ua

Зміст

1. Введення
2. Основний принцип і методи параметричного керування АД
3. Тиристорні регулятори напруги з фазовим керуванням
4. Робота ТРН на однофазне навантаження при фазовому керуванні
5. Робота ТРН на трифазне навантаження при фазовому керуванні
6. Реалізація за допомоги ТРН динамічного гальмування АД
7. Регулювання швидкості АД при фазовому керуванні ТРН



Введения



Класифікація загальнопромислових механізмів

За призначенням

- Підйомно-транспортні машини
 - крани (мостові, козлові, поворотні, баштові)
 - перевантажувальні мости
 - підйомні установки
 - канатні дороги
 - конвеєри, транспортери
 - ескалатори, ліфти
 - роботи, маніпулятори
- Землерийні машини
 - екскаватори (одноківшові та роторні)
 - землекопачі
- Машини для транспортування рідин і газів
 - насоси (відцентрові та поршневі)
 - компресори
 - вентилятори



Класифікація загальнопромислових механізмів

За областю призначення

- машинобудівні установки
- металургійні установки
- гірничі установки
- будівельні установки
- суднові установки

За характером технологічного процесу

- механізми циклічної дії
 - крани, ліфти, шахтні підйомні машини
- механізми непереривної дії
 - ескалатори, конвеєри тощо



Передумови та цілі регулювання швидкості ЗПМ

- ЕП є головним постачальником механічної енергії
- ЕП — основний споживач електроенергії (понад 60% усієї енергії, що виробляється в країні)
- Основна тенденція розвитку ЕП — розширення області застосування регульованих ЕП
 - вимоги технологічного процесу (плавний рух, точна зупинка механізму, обмеження навантажень електричної і механічної частини тощо)
 - не електричні засоби впливу на параметри → нерегульовані ЕП
 - зменшення питомого розходу електроенергії нерегульованих ЕП



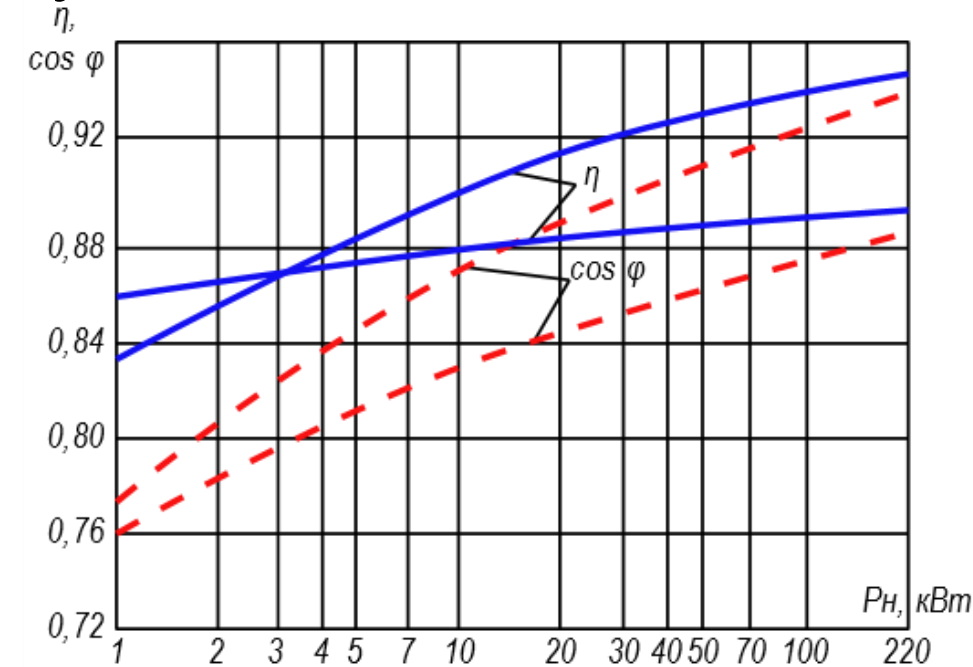
Умови для удосконалення і розширеного застосування регульованих ЕП ЗПМ

1. Зростання енергоємних технологій
2. Ускладнення технологічних операцій і зростання вимог щодо якості їх виконання
3. Поява і швидкий розвиток технічних засобів керування
4. Поява доступних обчислювальних засобів

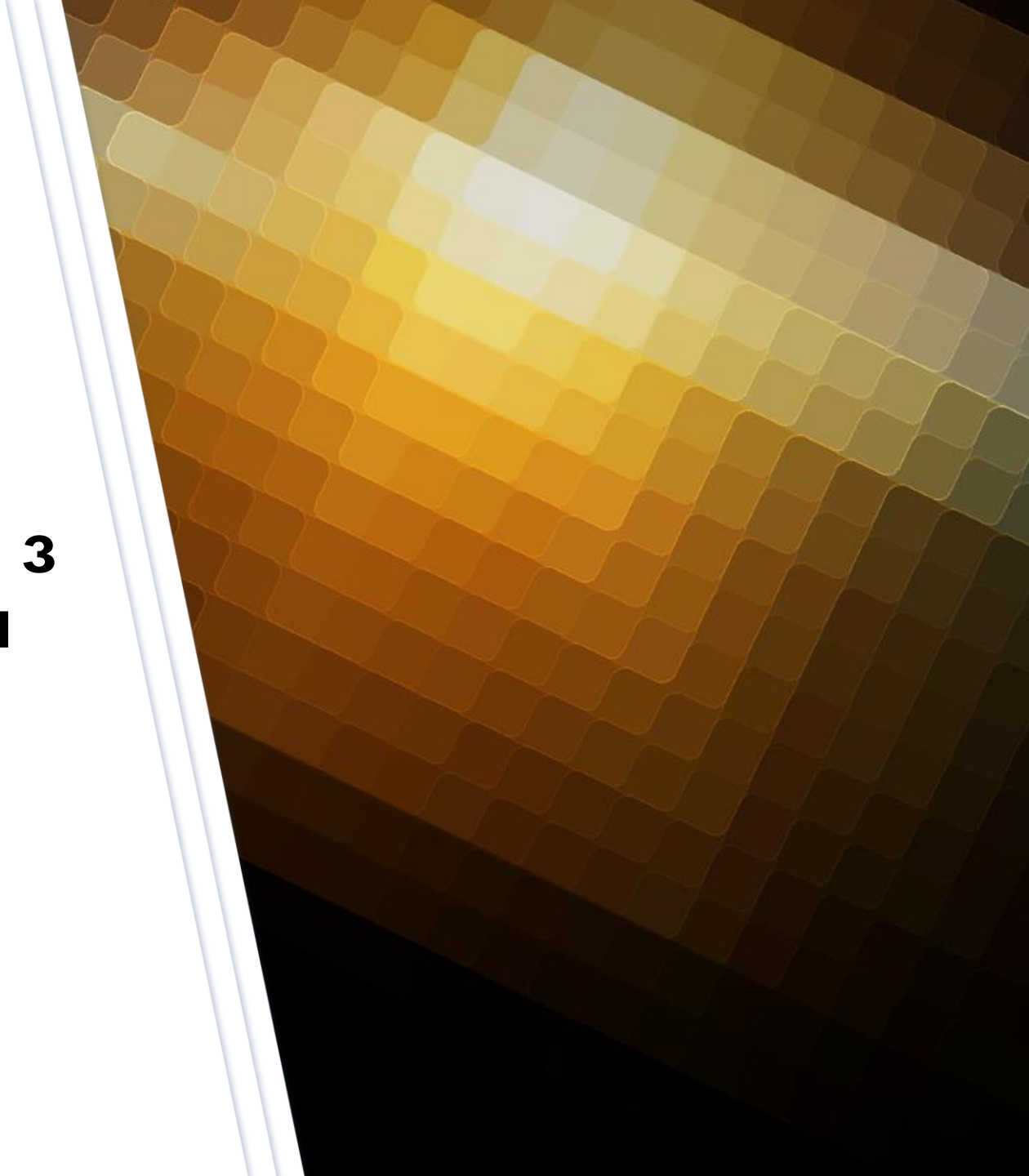


Шляхи енергозбереження в ЕП

1. Удосконалення процедури вибору двигуна для конкретних пристроїв
2. Перехід на енергозберігаючі двигуни
3. Створення спеціальних засобів, що мінімізують енергетичні втрати неномінального навантаження в нерегульованому ЕП
4. Перехід від нерегульованого ЕП до регульованого
5. Врахування, разом з іншими, енергетичних критеріїв оцінки його якості



Розділ 1. Асинхронні електроприводи з тиристорними регуляторами напруги статора



Основний принцип і методи параметричного керування АД

Загальна ознака параметричного керування

регулювання швидкості здійснюється за рахунок зміни ковзання при незмінній частоті напруги, що живить статорні кола

Основні методи параметричного керування:

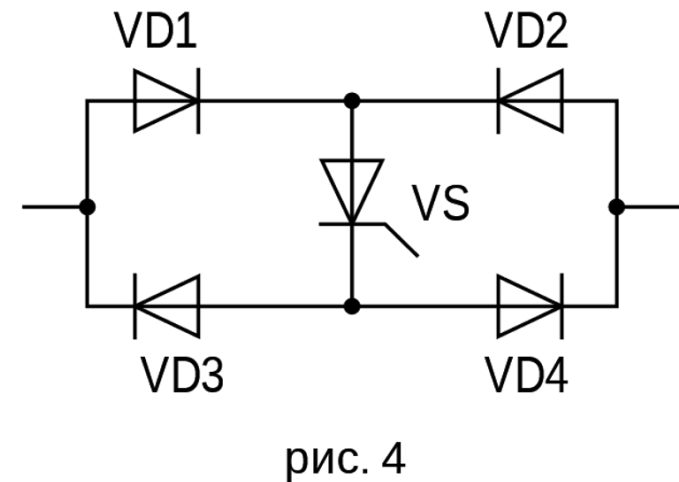
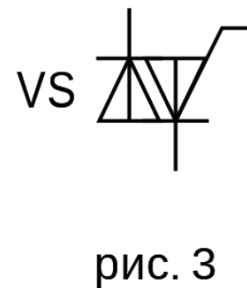
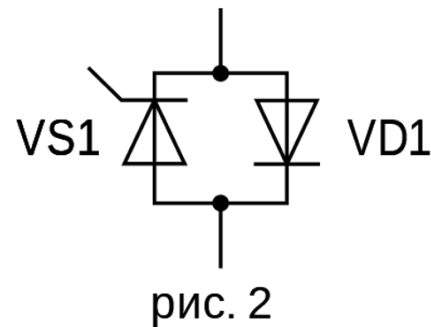
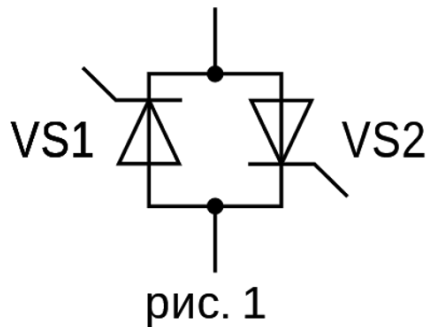
1. При керуванні зі сторони статора – регулювання амплітуди змінної напруги, що прикладається до обмоток статора (при постійній частоті);
2. При керуванні зі сторони ротора (для АД з фазним ротором) – змінення значення додаткового опору в колі ротора.



Тиристорні регулятори напруги (ТРН) з фазовим керуванням

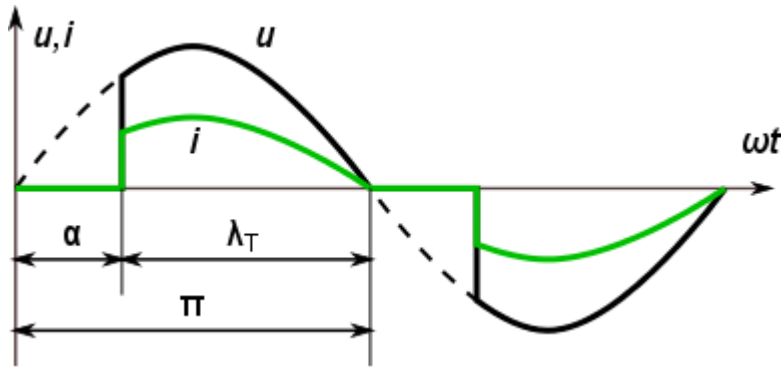
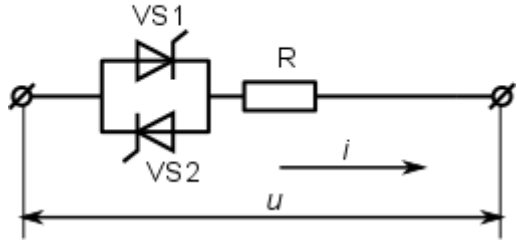
Фазове керування здійснюється завдяки ввімкненню між джерелом напруги і навантаженням напівкерованих ключових елементів з природною комутацією

Основні види ключових елементів, що застосовуються в ТРН

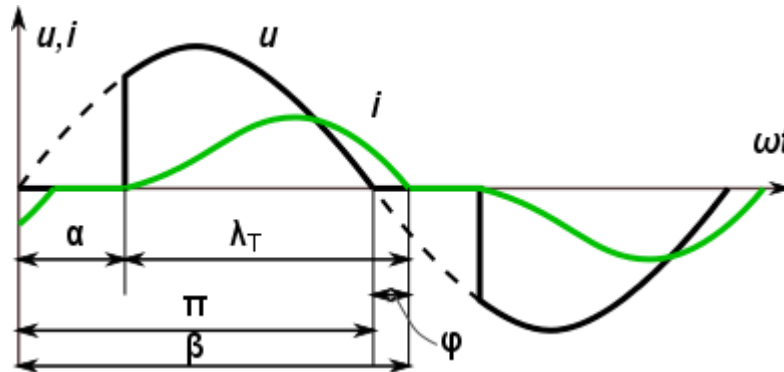
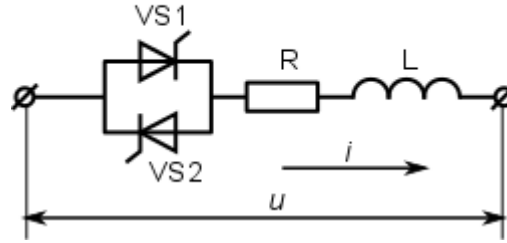


Робота ТРН на однофазне навантаження при фазовому керуванні

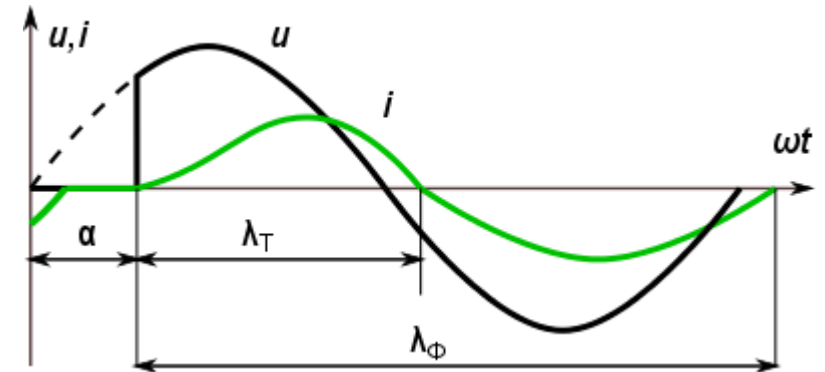
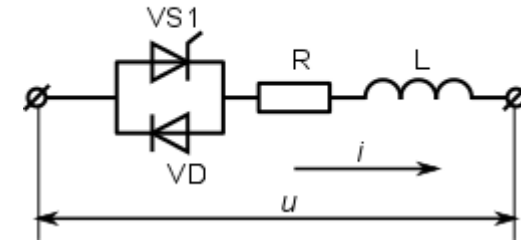
а) робота ТРН на R навантаження



б) робота ТРН на RL навантаження

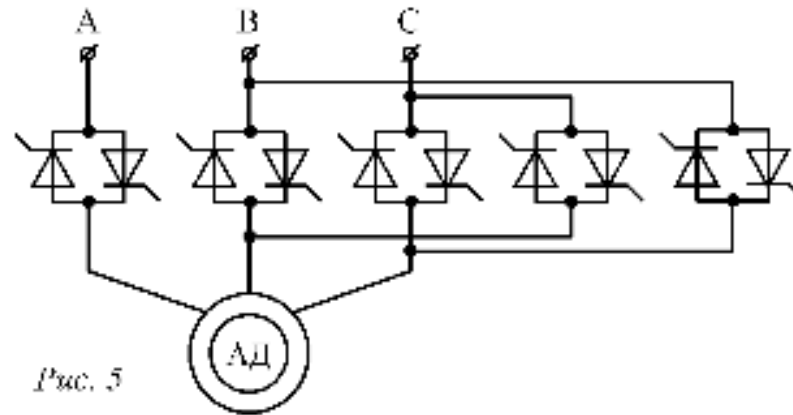
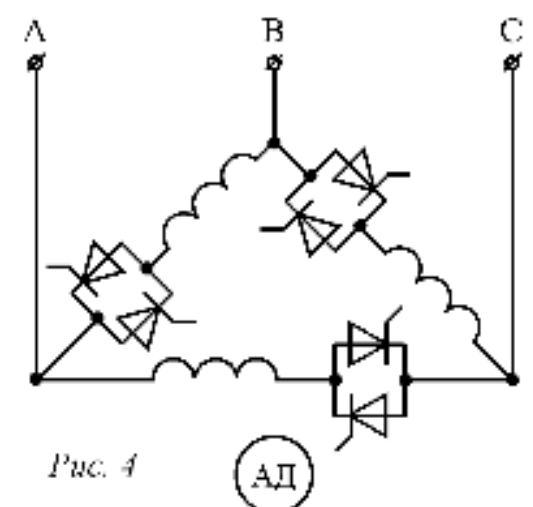
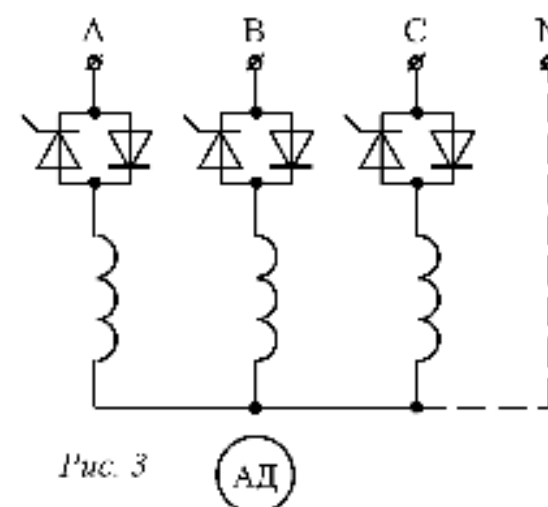
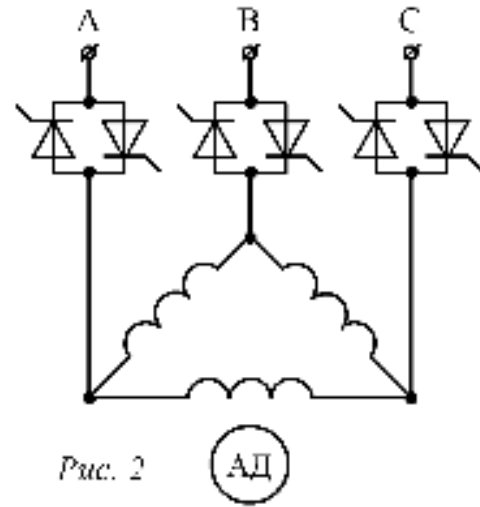
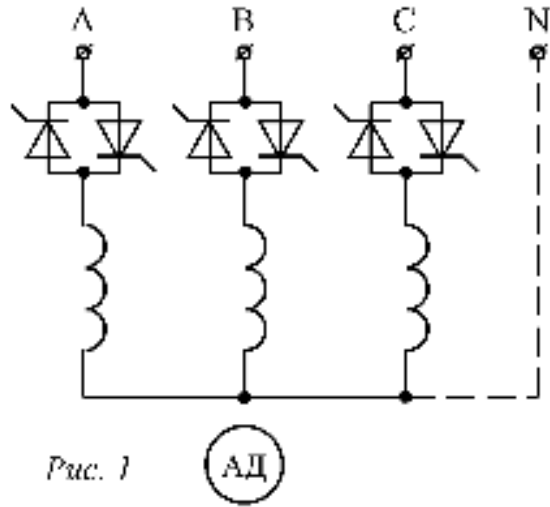


в) робота напівкерованого ТРН на RL навантаження



Робота ТРН на трифазне навантаження при фазовому керуванні

Основні силові схеми нереверсивних ТРН



Робота ТРН на трифазне навантаження при фазовому керуванні

Схеми ТРН з ключовими елементами, що ввімкнені в розсічку нульової точки статора

Основні силові схеми несиметричних ТРН

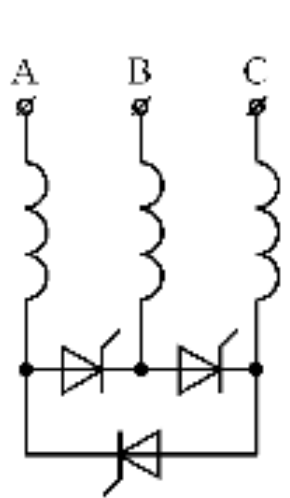


Рис. 6 (АД)

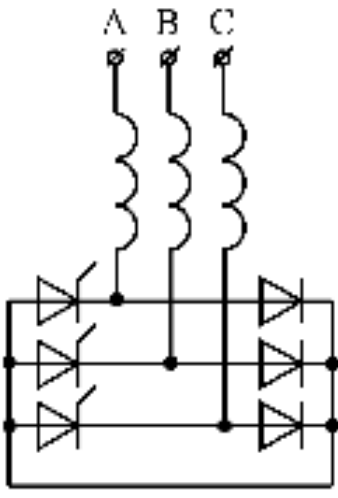


Рис. 7 (АД)

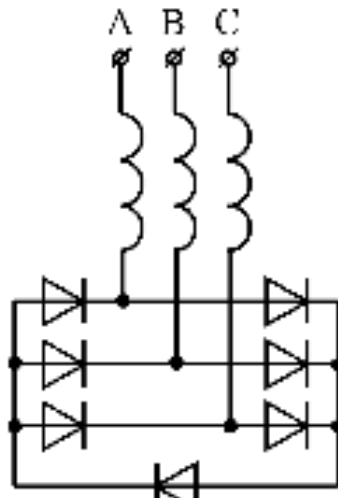


Рис. 8 (АД)

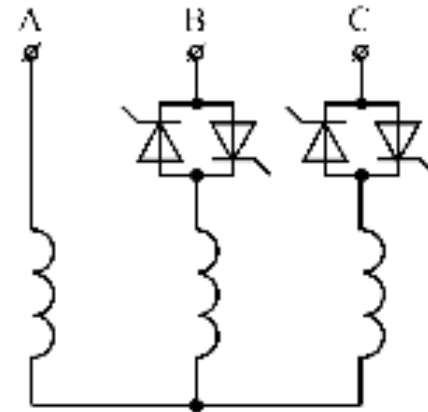


Рис. 9 (АД)

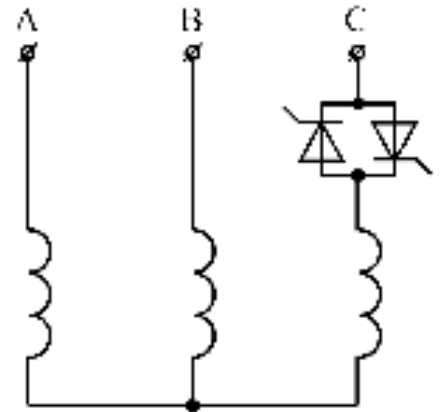


Рис. 10 (АД)



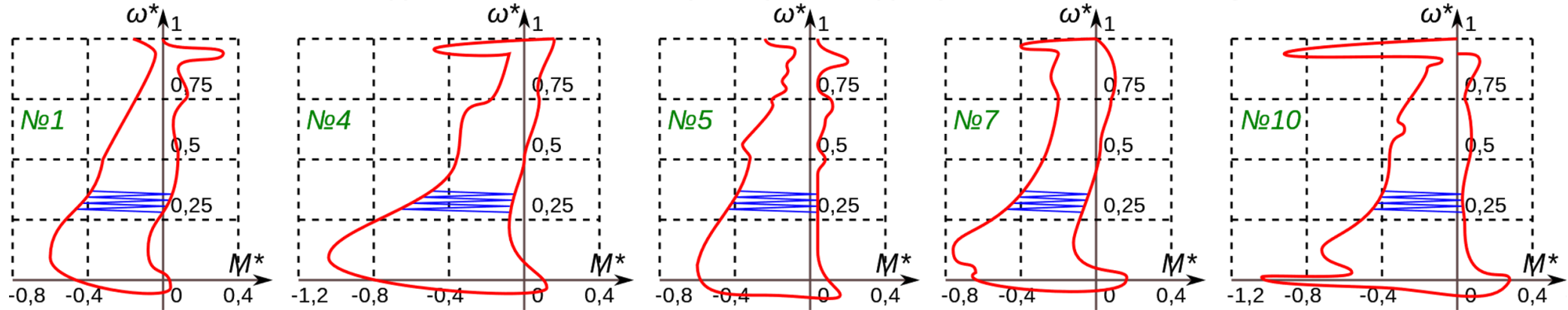
Реалізація за допомоги ТРН динамічного гальмування АД

- Для ефективного гальмування електропривода з тиристорним фазовим керуванням можна застосовувати усі способи електричного гальмування.
- Найпростіше реалізується динамічне гальмування шляхом переводу у випрямний режим тиристорів
- Керування інтенсивністю гальмування здійснюється впливом на величину постійної складової випрямленого струму
- Підвищення гальмівного ефекту і точності керування процесом гальмування досягається суміщенням різних способів гальмування

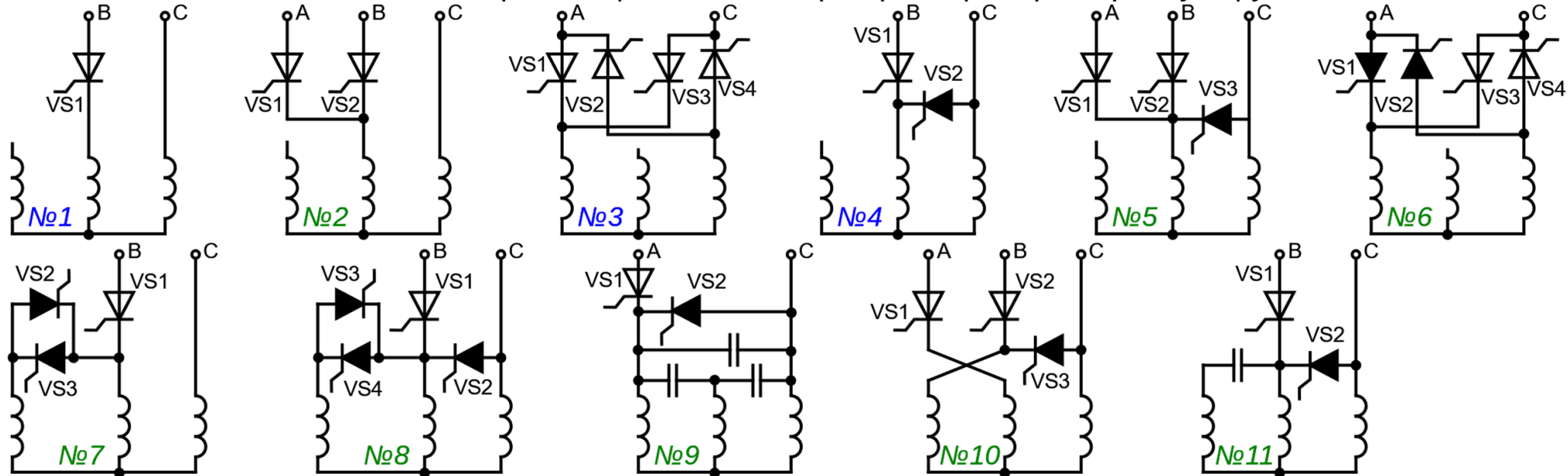


Реалізація за допомоги ТРН динамічного гальмування АД

Типові динамічні механічні характеристики для різних способів гальмування

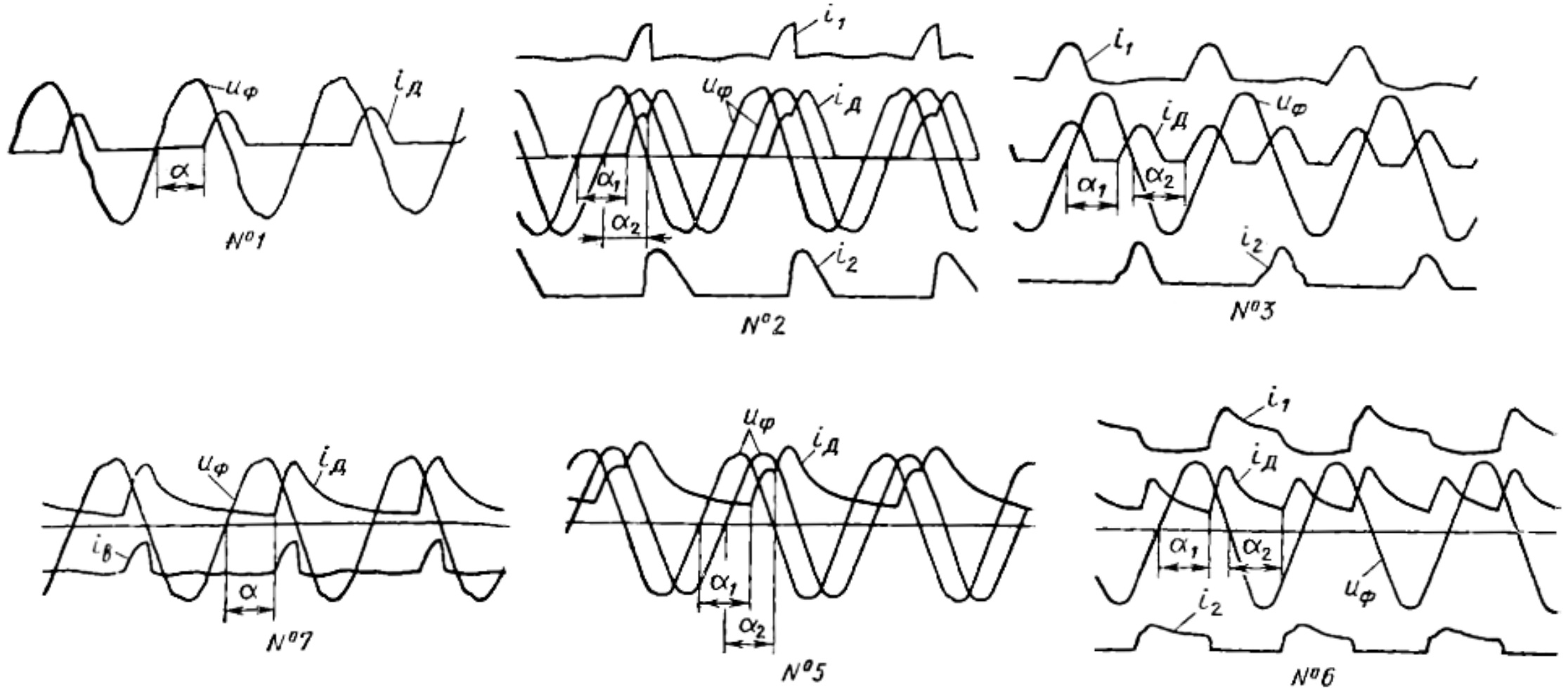


Основні схеми реалізації гальмівних пристроїв при тиристорному керуванні



Реалізація за допомоги ТРН динамічного гальмування АД

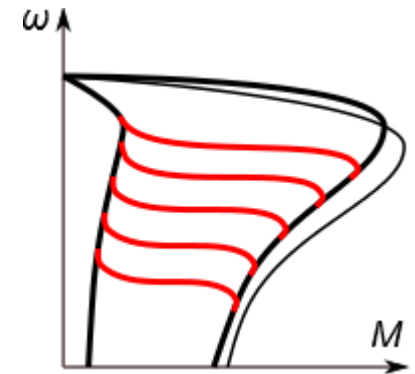
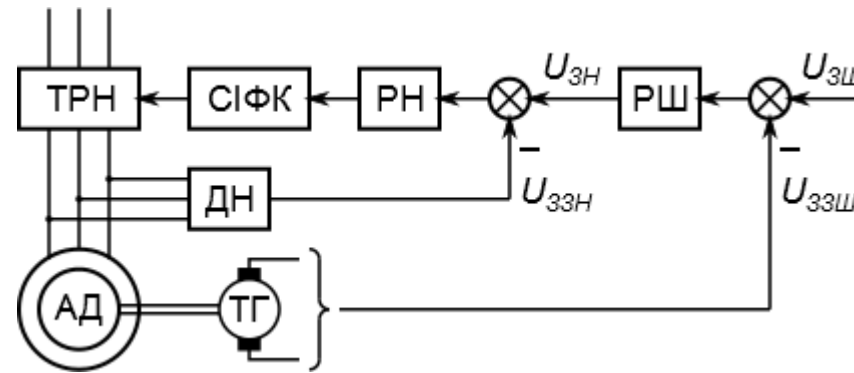
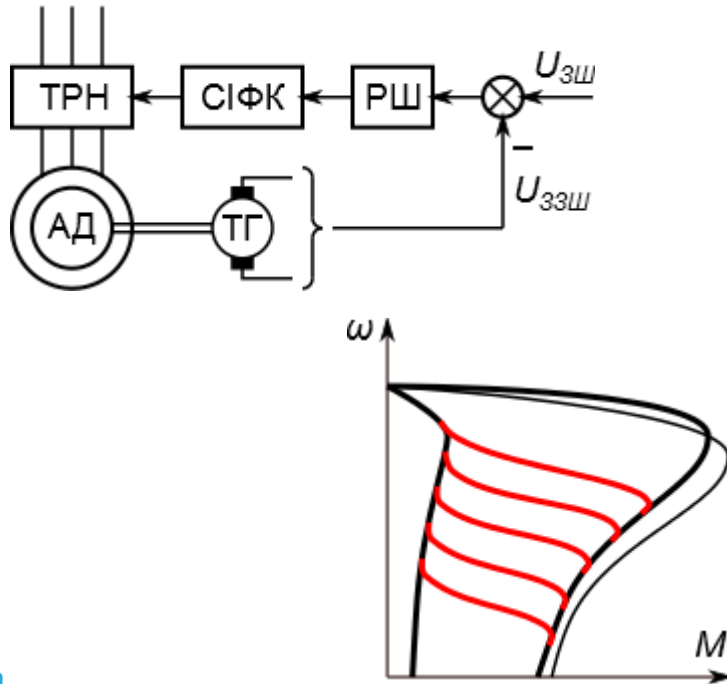
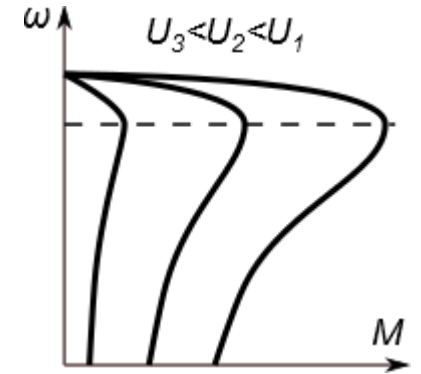
Осцилограми струму в обмотках статора асинхронного двигуна при гальмуванні за різними схемами



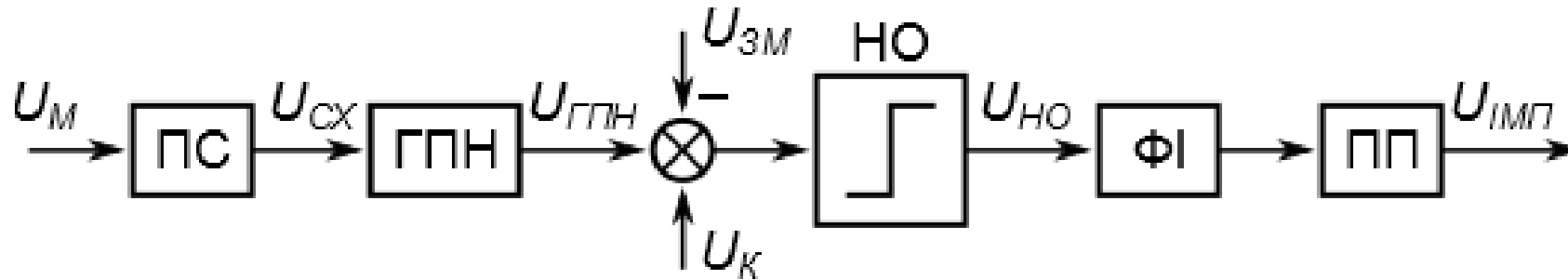
Регулювання швидкості АД при фазовому керуванні ТРН

$$M_{\text{ПРИР}} = \frac{2 M_{\text{КР.Н}}}{\frac{s}{s_{\text{КР}}} + \frac{s_{\text{КР}}}{s}}$$

$$M_{\text{КР.Н}} = \frac{3 \cdot U_{\Phi\text{Н}}^2}{2 \cdot \omega_0 \left(R_{1\Sigma} + \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_K^2} \right)}$$



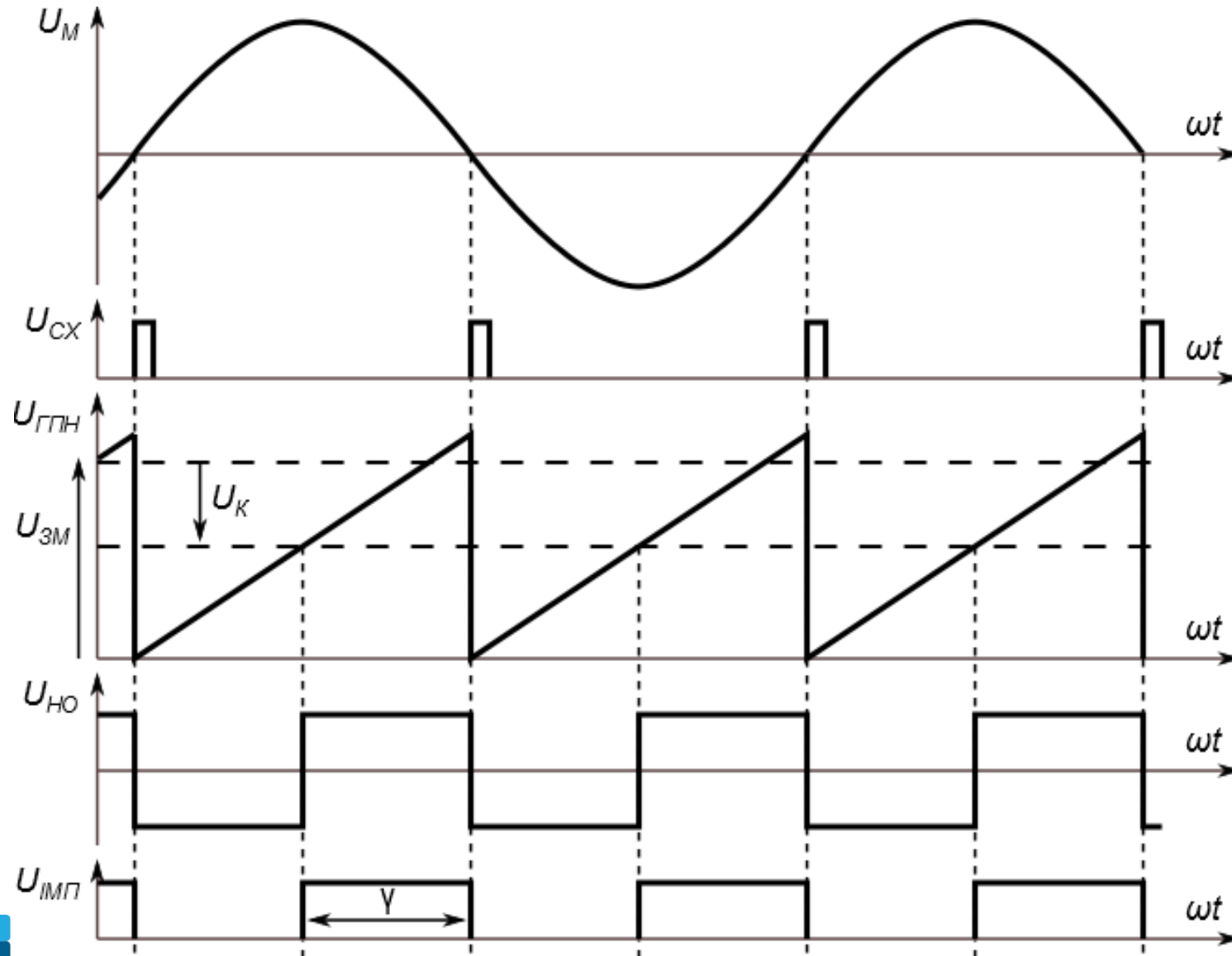
Системи фазового керування тиристорами (СІФК) ТРН



- ПС – пристрій синхронізації;
ГПН – генератор пилоподібної напруги;
НО – ноль-орган;
ФІ – формувач імпульсів;
ПП – підсилювач потужності.
 U_M – фазна напруга мережі;
 $U_{СХ}$ – напруга синхронізації;
 $U_{ЗМ}$ – напруга зміщення;
 U_K – напруга керування;
 $U_{ІМП}$ – напруга, що подається на керувальні електроди тиристорів однієї фази.



Системи фазового керування тиристорами (СІФК) ТРН



U_M – фазна напруга мережі;
 $U_{сх}$ – напруга синхронізації;
 $U_{ЗМ}$ – напруга зміщення;
 U_K – напруга керування;
 $U_{ИМП}$ – напруга, що подається на керувальні електроди тиристорів однієї фази.



Основні режими, що реалізуються ТРН

Окрім фазового керування за допомогою ТРН можна реалізувати:

- безконтактне підключення навантаження;
- режим накладення полів у несиметричних ТРН;
- плавний пуск і гальмування АД для зниження динамічних моментів;
- імпульсне керування;
- квазічастотне керування.



Плавний пуск і гальмування АД

Пуск і реверс при безпосередньому підключенні АД до мережі

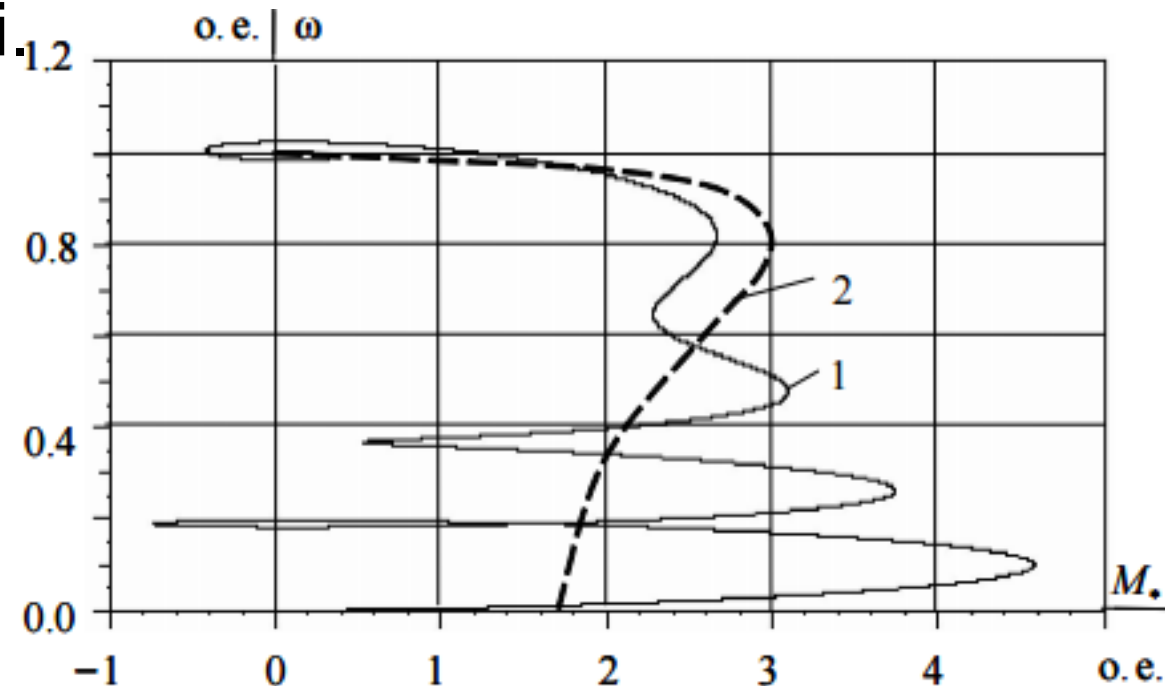
- Статична механічна характеристика АД — залежність між середніми значеннями моменту і швидкості двигуна у сталих режимах.
- Динамічна механічна характеристика — зв'язок між миттєвими значеннями моменту і швидкості АД під час перехідного процесу.
- Максимальний ударний момент в АД виникає в перші періоди включення напруги живлення.
- Динамічні моменти можуть у декілька разів перевищувати критичний момент $M_{кр}$.



Плавний пуск і гальмування АД

Пуск і реверс при безпосередньому підключенні АД до мережі

- Електромагнітні процеси, що виникають а АД, практично повністю затухають до виходу АД на швидкість, яка відповідає критичному ковзанню $S_{кр}$.
- Найбільше розходження між статичною і динамічною характеристиками — при реверсі.
 - перехід при затухаючому магнітному полі машини, то $M_{уд} = (2...3)M_{кр}$.
 - перехід при незатухаючому магнітному полі машини $M_{уд} = (5...7)M_{кр} \approx (15...19)M_{н}$.



Плавний пуск і гальмування АД

Шляхи впливу на динаміку приводів при використанні ТРН

1. Створення початкового магнітного потоку з метою компенсації ним вільних складових моменту.
2. Вибір моменту ввімкнення при сприятливому фазовому зсуві між вектором ЕРС від незатухаючого магнітного поля, створеного струмами ротора і вектором напруги мережі живлення.
3. Зміна величини і швидкості наростання змінної напруги, що прикладається до АД в перехідних режимах.



Плавний пуск і гальмування АД

Бажані варіанти динамічних процесів в АД при пуску

1. Пуск з обмеженням ударного моменту без збільшення часу розгону порівняно з контакторним керуванням.
2. Обмеження до заданої величини прискорення по всій ділянці розгону (плавний пуск).
3. Пуск за динамічною характеристикою, близькою до статичної.

Кут α змінюється за експоненціальним законом: $\alpha = \alpha_{\text{поч}} \cdot e^{-t/\tau}$,

або ж напруга керування: $U = U_{\text{к.поч}} \cdot e^{-t/\tau}$.



Плавний пуск і гальмування АД

Способи впливу на перехідні процеси в АД при зміні кута відпирання тиристорів за експоненціальним законом

1. При пуску і реверсі регулювання величини кута $\alpha_{\text{поч}}$, що призводить до змінення величини початкової напруги, що прикладається до АД.
2. При пуску і реверсі регулювання величини постійної часу τ , яка визначає темп змінення величини напруги в перехідних процесах.
3. При реверсі регулювання часу паузи t_3 між закриттям однієї групи тиристорів і відпиранням другої групи.



Плавний пуск і гальмування АД

Раціональні параметри закону змінення α при пуску привода

1. Для забезпечення пуску АД з обмеженням до критичного значення моментом без зниження швидкодії $t=0,02 - 0,04$ с.
2. Для забезпечення пуску АД за динамічною характеристикою близькою до статичної слід задати $t=0,1 - 0,15$ с.
3. Для здійснення пуску АД з обмеженням прискоренням слід прийняти $t=0,15 - 0,20$ с.
4. Для усунення запізнення при подаванні керуючих імпульсів приймають початковий кут керування тиристорами $\alpha=135^\circ \dots 140^\circ$.



Плавний пуск і гальмування АД

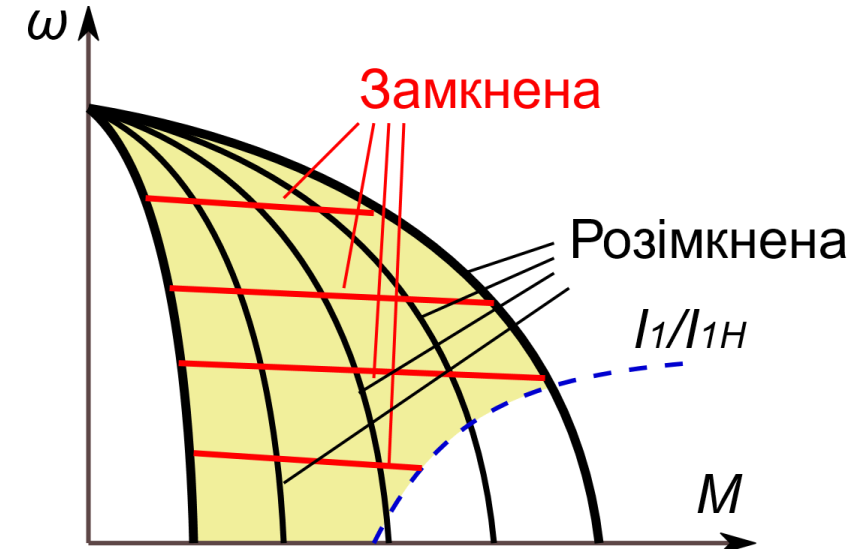
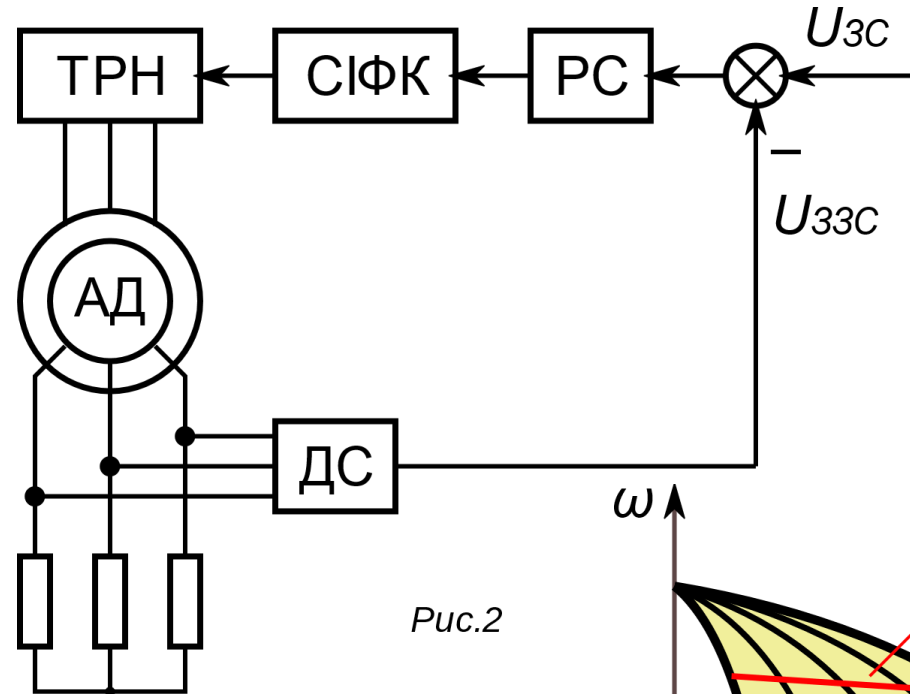
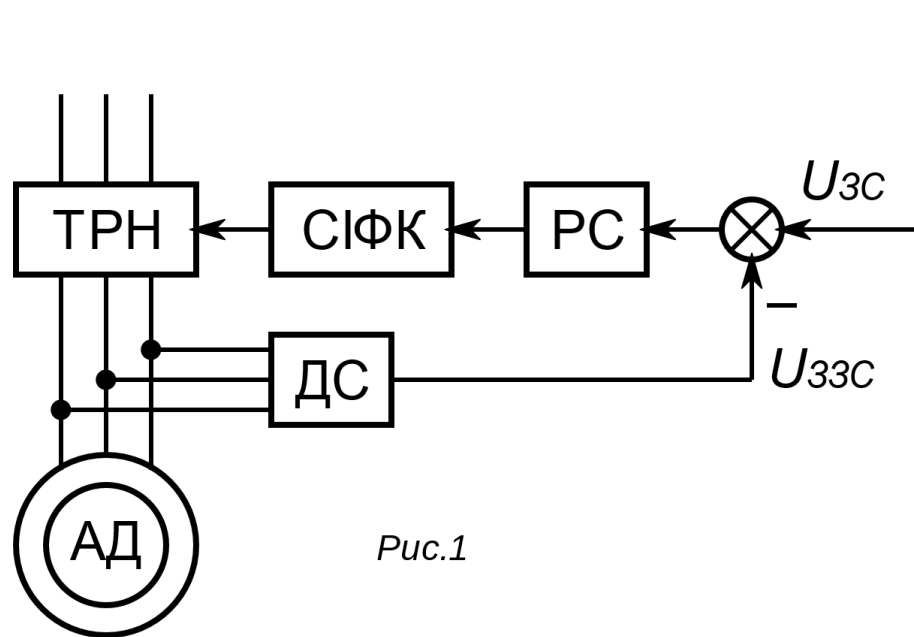
Раціональні параметри закону змінення α при реверсі привода

1. Для усунення запізнення при подаванні керуючих імпульсів приймають початковий кут керування тиристорами $\alpha=135^\circ \dots 140^\circ$.
2. Для забезпечення реверса АД з обмеженими до критичного значення перехідними моментами $t=0,06 - 0,1$ с, час паузи $t_p=0,02 - 0,06$ с.
3. Для реалізації плавного процесу реверсу слід збільшити постійну часу до рівня $t=0,15 - 0,20$ с, а час паузи залишити $t_p=0,02 - 0,06$ с.



Плавний пуск і гальмування АД

Формування бажаних перехідних режимів АД з ТРН шляхом введення зворотних зв'язків за струмом

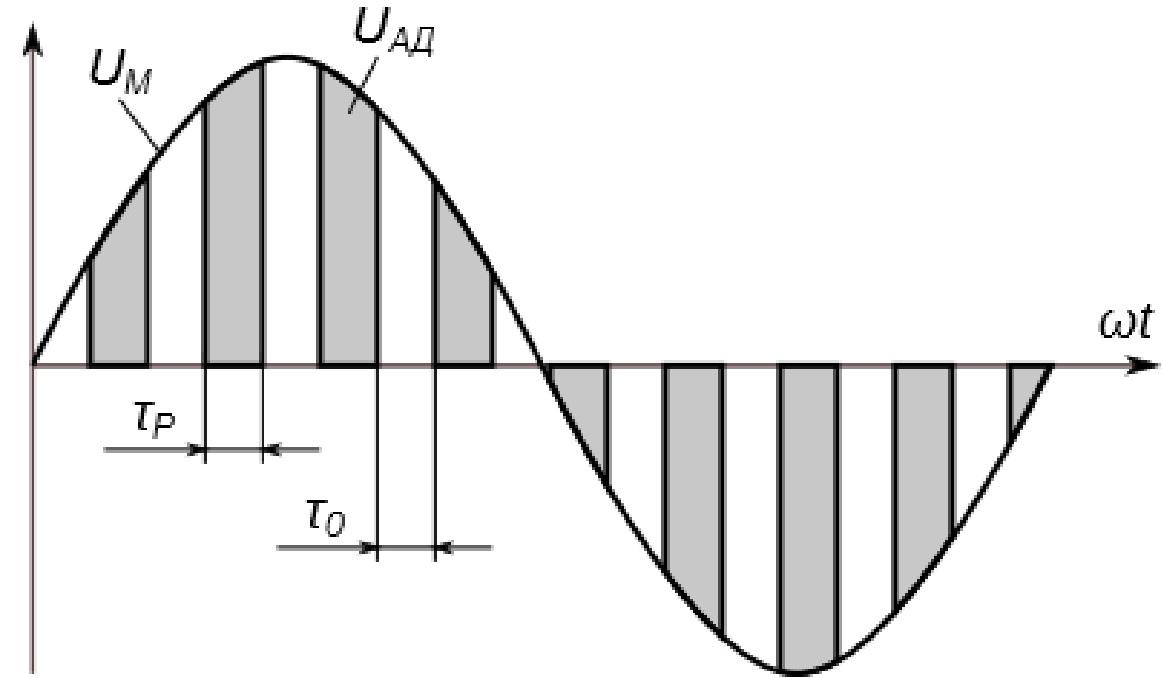


Імпульсне керування швидкістю АД за допомогою ТРН

$T_{\text{ц}} = \tau_p + \tau_0$ – період циклу роботи;

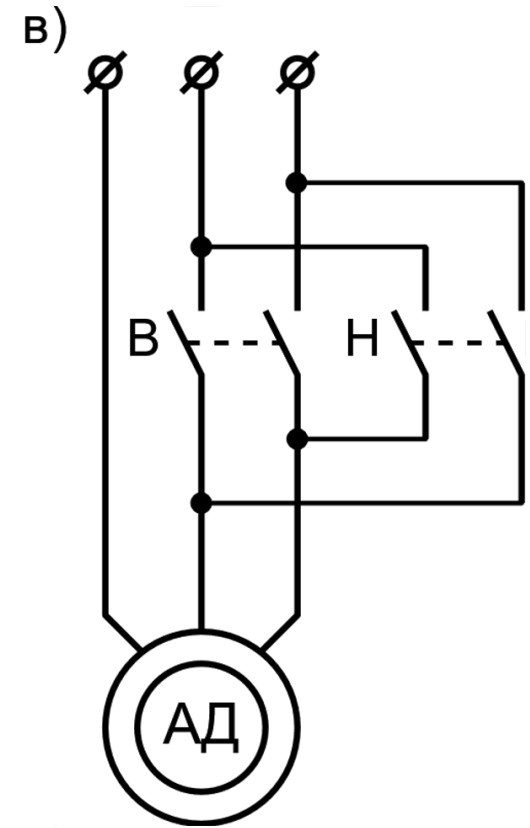
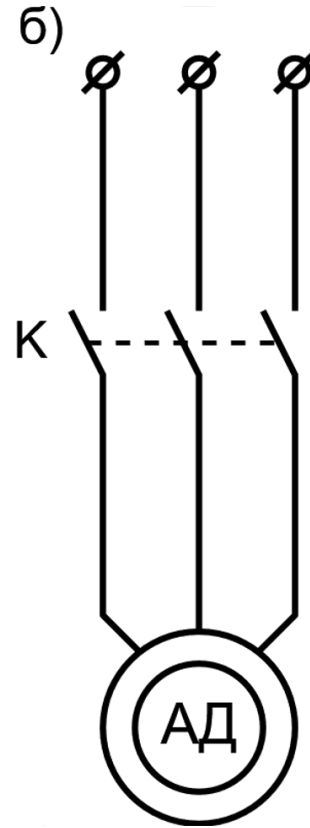
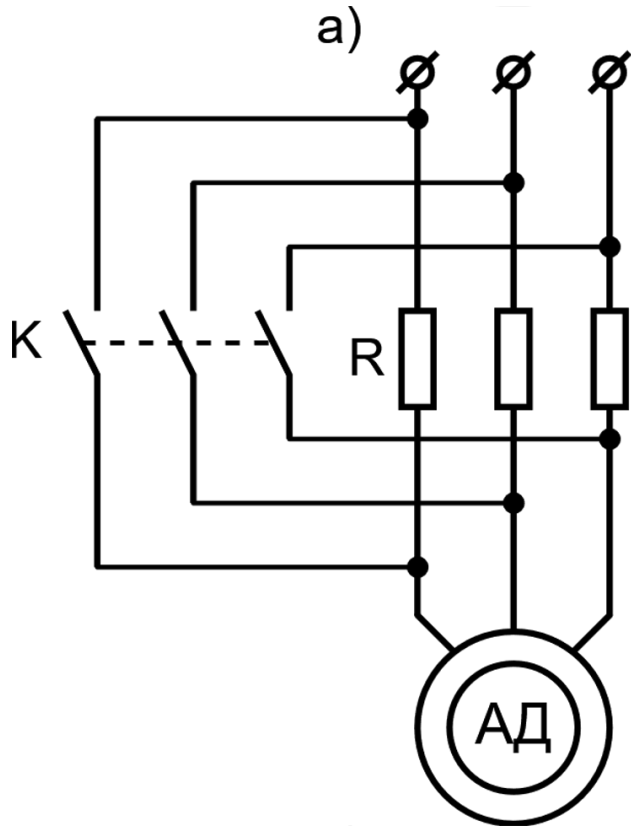
$f_{\text{к}} = \frac{1}{\tau_p + \tau_0}$ – частота комутації ключів;

$q = \frac{\tau_p}{\tau_p + \tau_0}$ – відносна тривалість роботи АД.



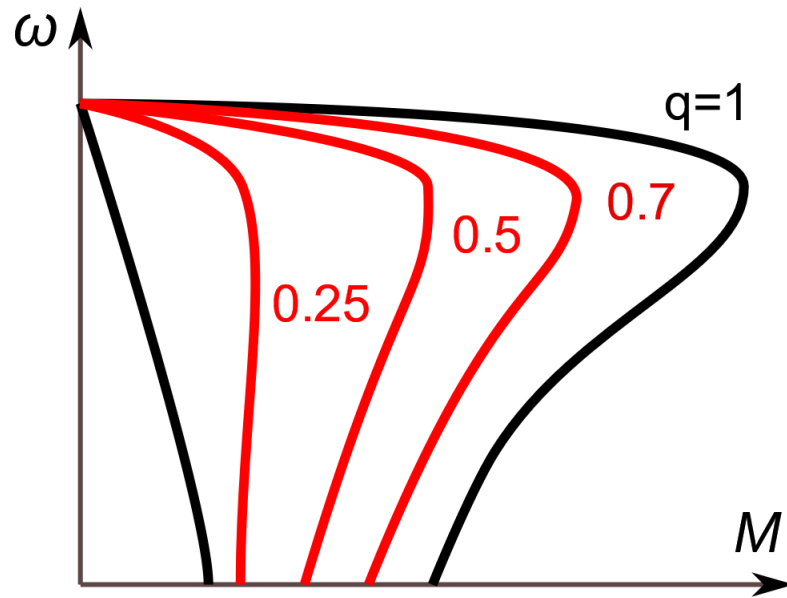
Імпульсне керування швидкістю АД за допомогою ТРН

Типові схеми підключення електродвигуна до джерела живлення

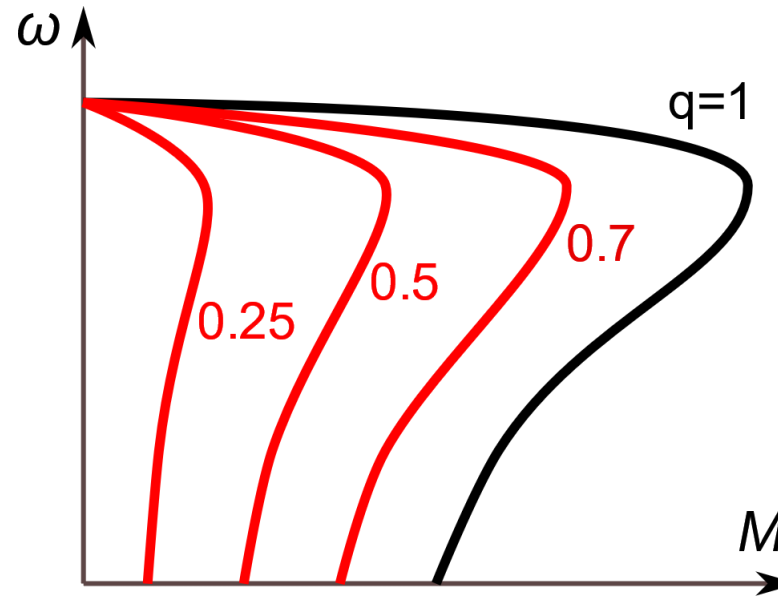


Імпульсне керування швидкістю АД за допомогою ТРН

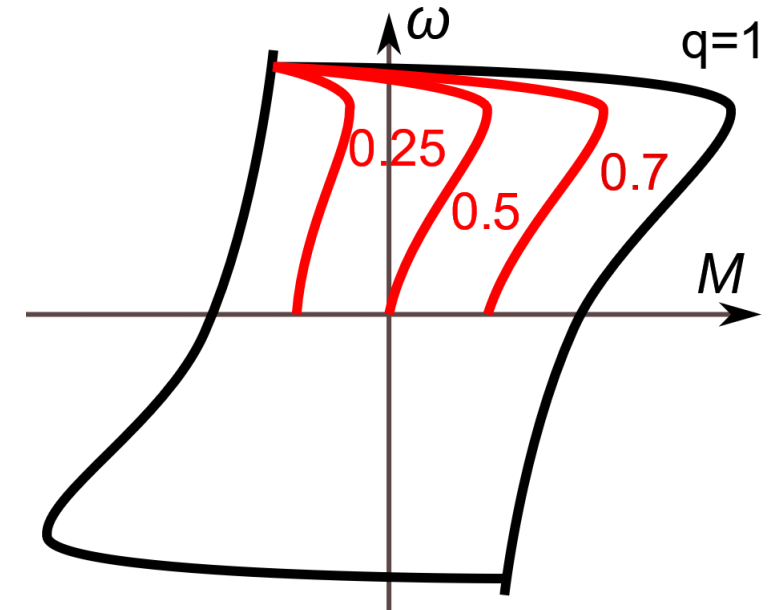
Механічні характеристики при імпульсному керуванні в статорі АД КЗ



Введенням активного опору в коло статора



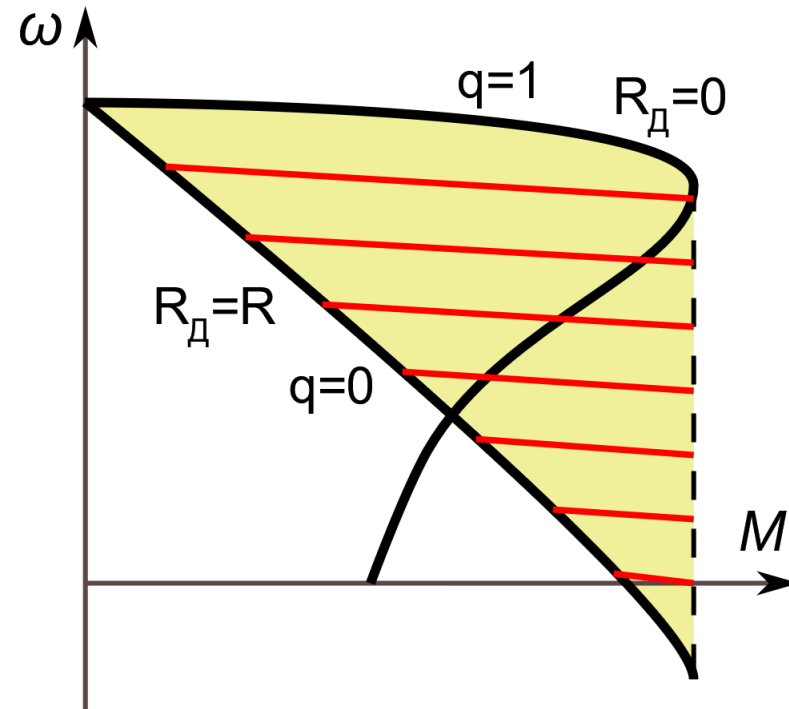
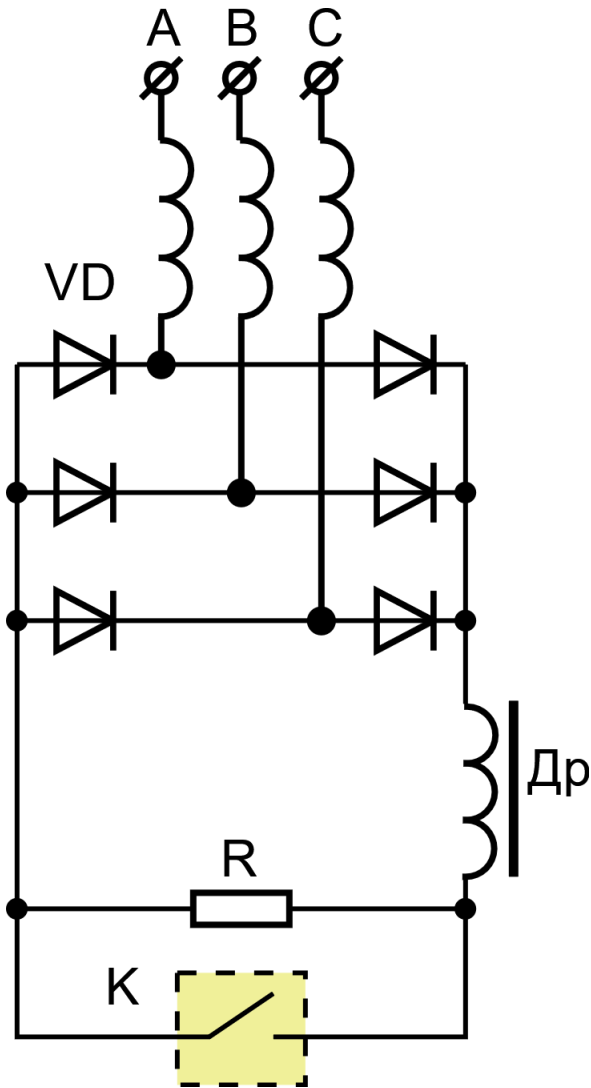
Почергового відключення обмотки статора від мережі



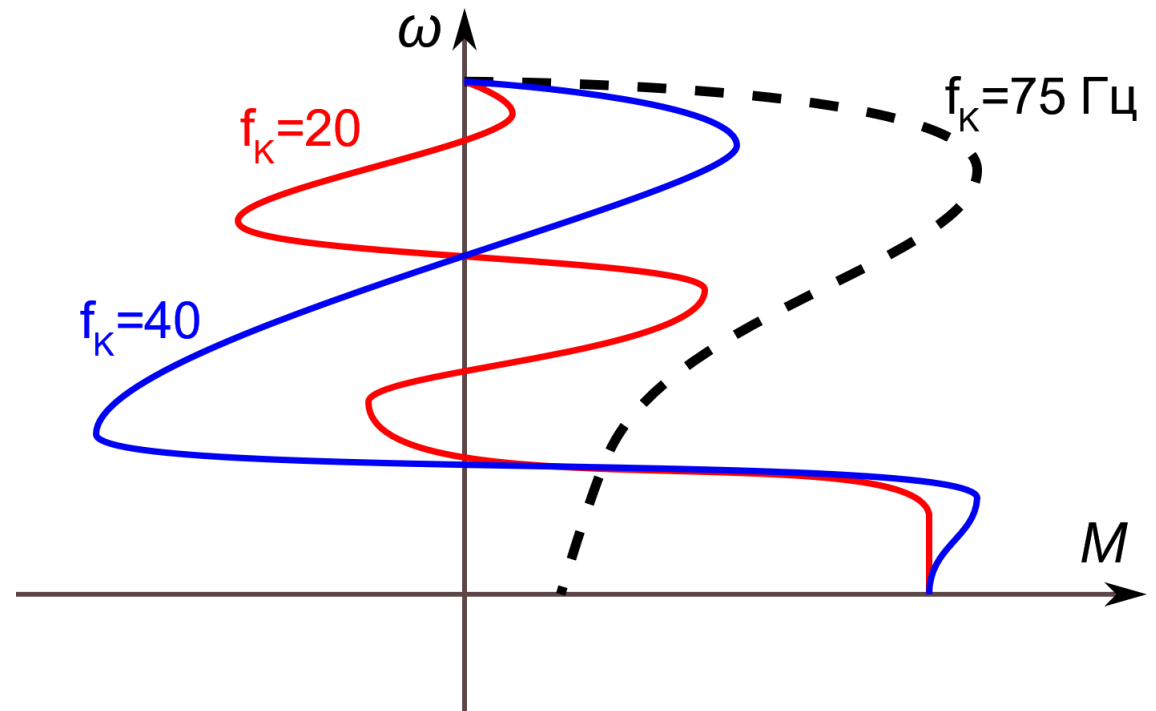
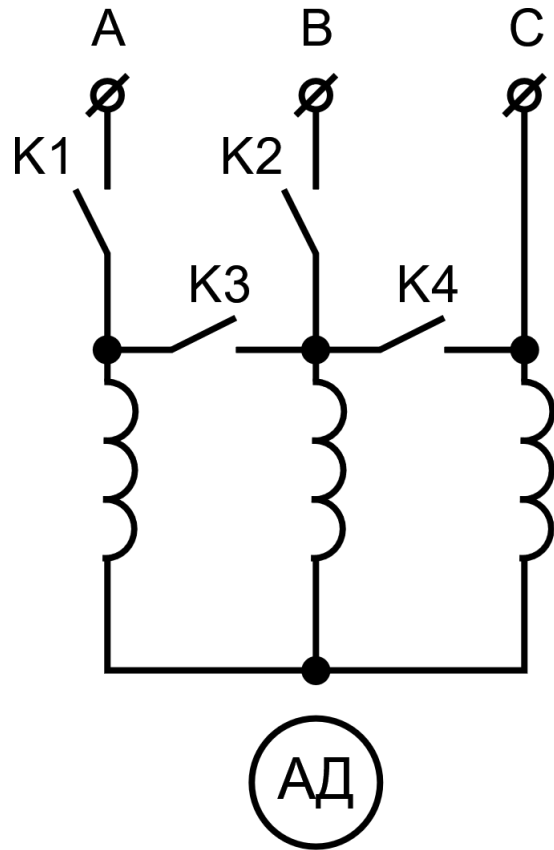
Почергового перемикавання режимів двигуна та гальмування



Імпульсне керування швидкістю АД за допомогою ТРН



Імпульсне керування швидкістю АД за допомогою ТРН



Діапазон змінення параметрів керуючої дії:
 $\tau_{p\min} = 0,1(\tau_0 + \tau_p) = 0,1 \cdot T_{\text{ц}} \quad q = 0,1 \dots 0,9,$
 $\tau_{0\min} = 0,1(\tau_0 + \tau_p) = 0,1 \cdot T_{\text{ц}} \quad f_k = 2 \dots 300 \text{ Гц}.$



Імпульсне керування швидкістю АД за допомогою ТРН

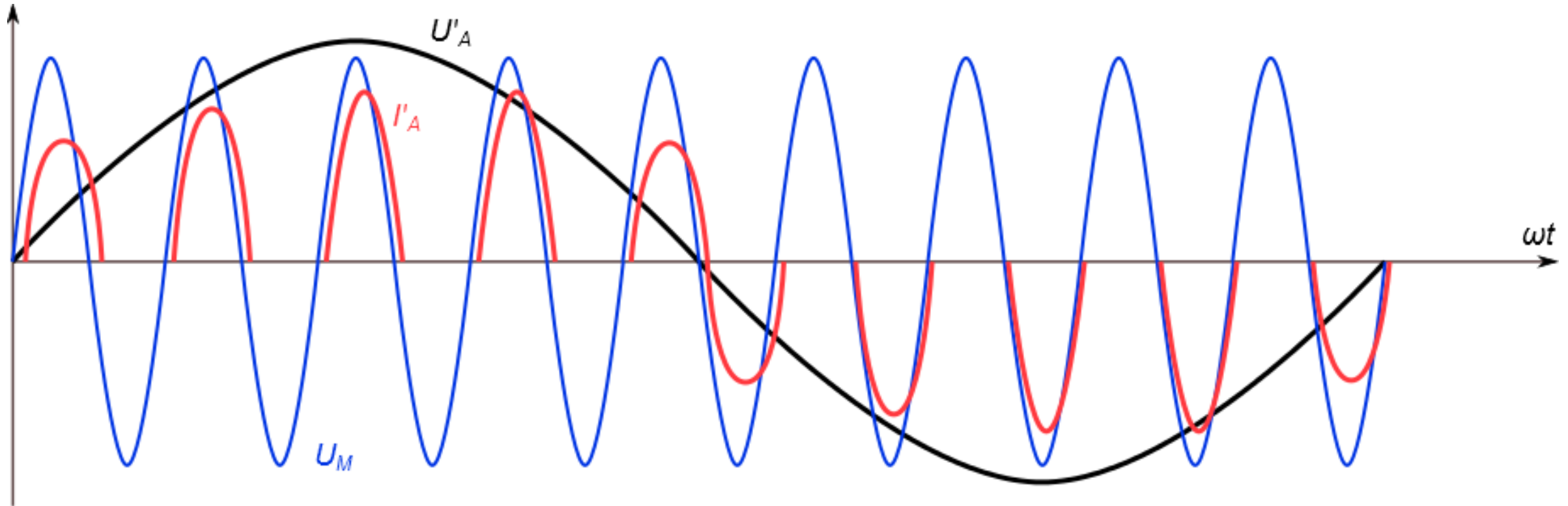
Переваги імпульсного керування швидкості АД:

- Залежно від частоти комутації є безліч проміжних значень швидкості ідеального холостого ходу і жорстких робочих ділянок механічної характеристики. Це дозволяє регулювати швидкість АД у розімкнутій системі без зворотного зв'язку за швидкістю.
- При підвищеній частоті комутацій ключів втрати в АД виявляються меншими, ніж при фазовому керуванні.
- Суттєво (в 1,2 – 1,4 рази) підвищується коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) при малих навантаженнях.

Імпульсне керування використовується рідше, ніж фазове з-за великих динамічних коливань струму, потужності і швидкості АД.



Квазічастотне керування швидкістю АД за допомогою ТРН

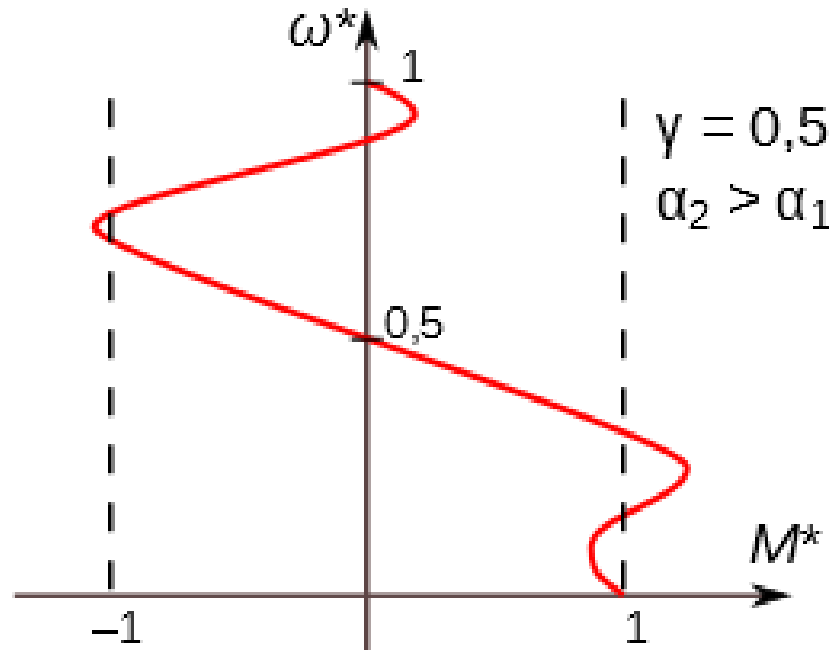


$$\begin{cases} U'_A = \sin(\gamma - \varphi') \\ U'_B = \sin(\gamma - \varphi' \mp 2\pi/3) \\ U'_C = \sin(\gamma - \varphi' \pm 2\pi/3) \end{cases} \quad \gamma = \frac{2\pi f'}{\omega_0}, \quad \varphi' - \text{начальний фазовий зсув,}$$

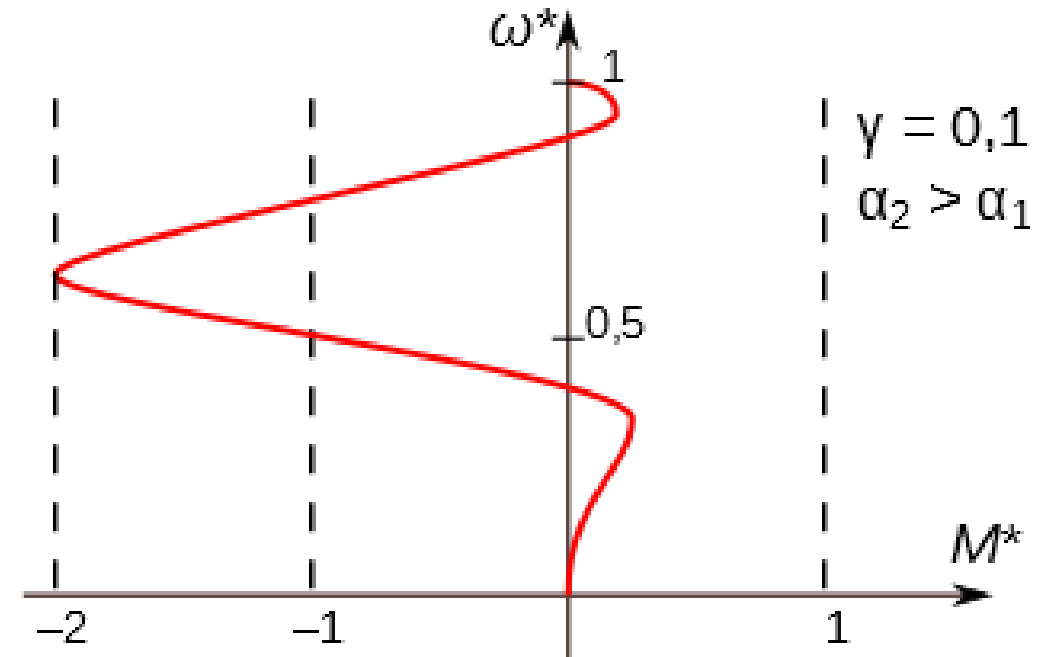


Квазічастотне керування швидкістю АД за допомогою ТРН

При згідному чергуванні фаз
 U' і $U_{\text{мережі}}$



При зустрічному чергуванні фаз
 U' і $U_{\text{мережі}}$



Області застосування ТРН статора АД

ТРН застосовують для механізмів малої потужності (до 100 кВт), які не вимагають довготривалого і глибокого регулювання швидкості ($D=10\dots15$).

1. Механізми циклічної дії, що працюють в повторно-короткочасних режимах із частими пусками (режими S4, S5) при частоті увімкнень $h=200\dots300$ ввімкн/год і часу пуску $t<0,5\dots1$ сек. (крани, ліфти, лебідки, дозатори).

Функції ТРН:

- безконтактний вмикач;
- формування пускових і гальмівних режимів;
- регулювання швидкості.

2. Механізми тривалої дії (режим S1), в яких момент опору знижується при зниженні швидкості (насоси, вентилятори).

Функції ТРН: регулювання продуктивності їх роботи.

3. Механізми, що працюють у переміжному режимі (режим S6) з чергуванням періодів навантаження з періодами холостого ходу.

Функції ТРН: зменшення втрат холостого ходу.



Тиристорні станції керування ТСУ-2

