

Лекция № 10

# Крокові двигуни

*Крокові двигуни* – безщіткові двигуни постійного струму, які перетворюють електричні імпульси напруги керування в дискретні кутові або лінійні переміщення ротора з можливою його фіксацією в потрібних положеннях.

Переваги крокової двигуна:

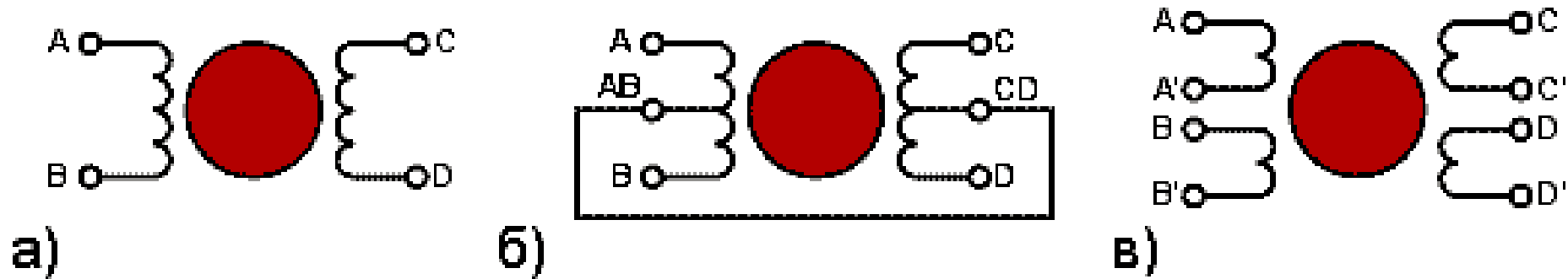
- Кут повороту ротора визначається числом імпульсів, які подані на драйвер, немає необхідності у зворотному зв'язку, а швидкість пропорційна частоті вхідних імпульсів;
- Точне позиціонування і повторюваність, помилка не накопичується від кроку до кроку;
- Швидкий старт, реверс;
- Можливість отримання низьких швидкостей, а отже, відсутня необхідність у застосуванні редуктора;
- Відсутність колектора, отже, висока надійність;
- У двигунах з постійними магнітами є фіксуючий момент (коли статор знеструмлений), рівний приблизно 10% від моменту утримання.

Недоліки:

- Номінальне споживання потужності, навіть без навантаження;
- Можливий пропуск кроку, отже, втрата контролю положення;
- Явище резонансу (момент дорівнює нулю на частоті резонансу);
- Низька питома потужність крокового приводу;
- Складності керування на високих швидкостях;
- Ускладнена робота на високих швидкостях, внаслідок не миттєвого наростання струму.

По конструкції крокові двигуни діляться на три основні типи:

- Двигуни зі змінним магнітним опором (реактивні);
- Двигуни з постійними магнітами;
- Гібридні двигуни.



**Біполярний КД (а), уніполярний (б) и чотирьохобмотковий (в).**

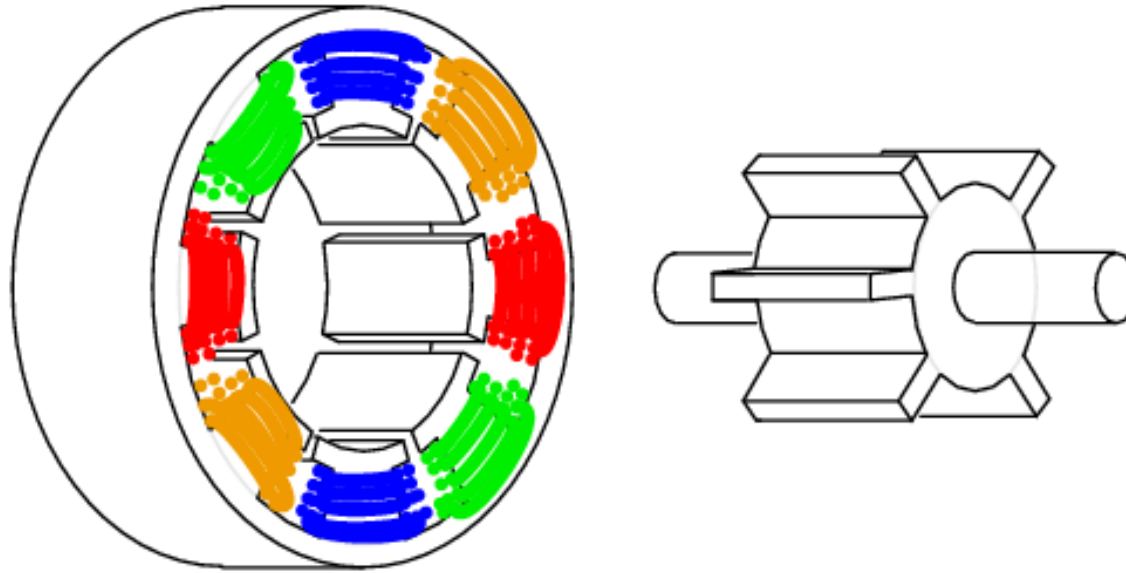
За способом живлення КД розділяються на біполярні та уніполярні.

Уніполярний (однополярний) ВД оснащено однією обмоткою в кожній фазі, середина обмотки має вивід. Кожна секція обмотки включається так, щоб забезпечувати певний напрям магнітного поля.

Біполярні крокові двигуни з постійними магнітами сконструйовані більш простіше, ніж уніполярні двигуни, обмотки в них не мають центрального відведення.

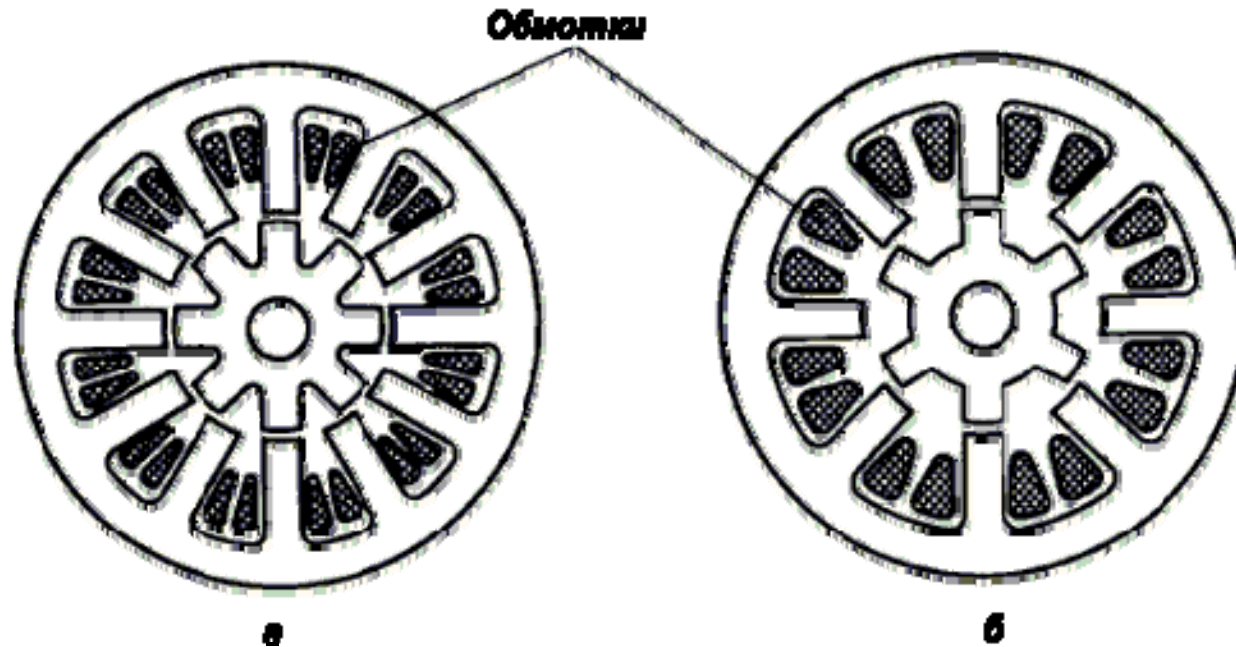
Принцип дії всіх КД заснований на дискретній зміні стану електромагнітного поля в повітряному проміжку. Це досягається імпульсним збудженням (або перемиканням) її обмоток. Цим вимогам відповідає широкий клас пристроїв: електромагніти з поворотною пружиною храповим, анкерним або фрикційним механізмом, синхронні електричні машини, асинхронні електричні машини з пустотілим ротором, сельсини.

## Двигуни зі змінним магнітним опором



Конструкція двигуна зі змінним магнітним опором

При протіканні струму через одну з обмоток, ротор прагне зайняти положення напроти відповідних їй полюсів. Для зміни положення ротора необхідно знеструмити поточну обмотку і підключити до живлення наступну. Даний тип двигуна нечутливий до напрямку протікання струму в обмотках. Внаслідок відсутності намагненості ротора, не має фіксуючого моменту і забезпечує менший робочий момент у порівнянні з іншими типами крокових двигунів.

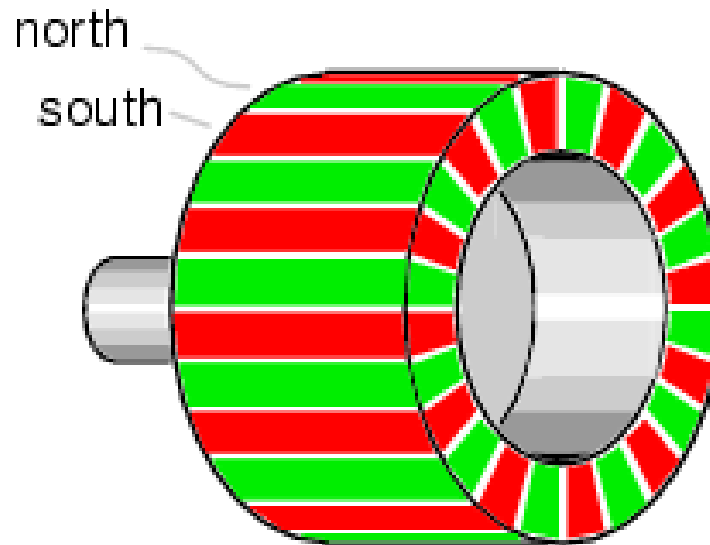


## Конструкція реактивних КД (КД зі змінним опором)

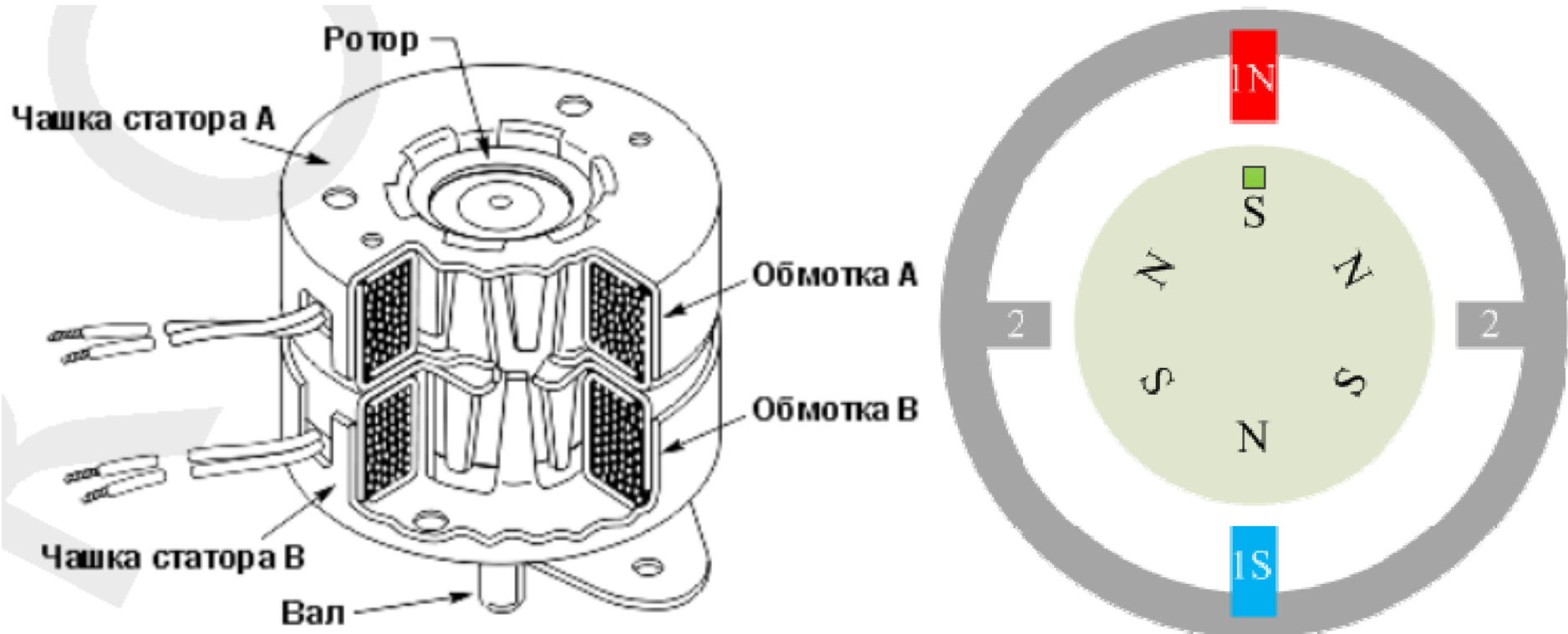
### Двигуни з постійними магнітами

Конструкція статора даного типу двигунів мало чим відрізняється від конструкції двигунів зі змінним магнітним опором. Головна відмінність в роторі, він містить постійні магніти. Полюса ротора, що чергуються, мають прямолінійну форму і розташовані паралельно осі двигуна.

На рисунку приведено двофазний двигун, що має три пари полюсів на роторі і дві пари полюсів на статорі. Внаслідок намагніченості ротора, даний тип двигунів забезпечує більший момент у порівнянні з двигуном із змінним магнітним опором, а також має фіксуючий момент. Максимальна швидкість цього типу двигунів обмежується зворотньою ЕРС з боку ротора.



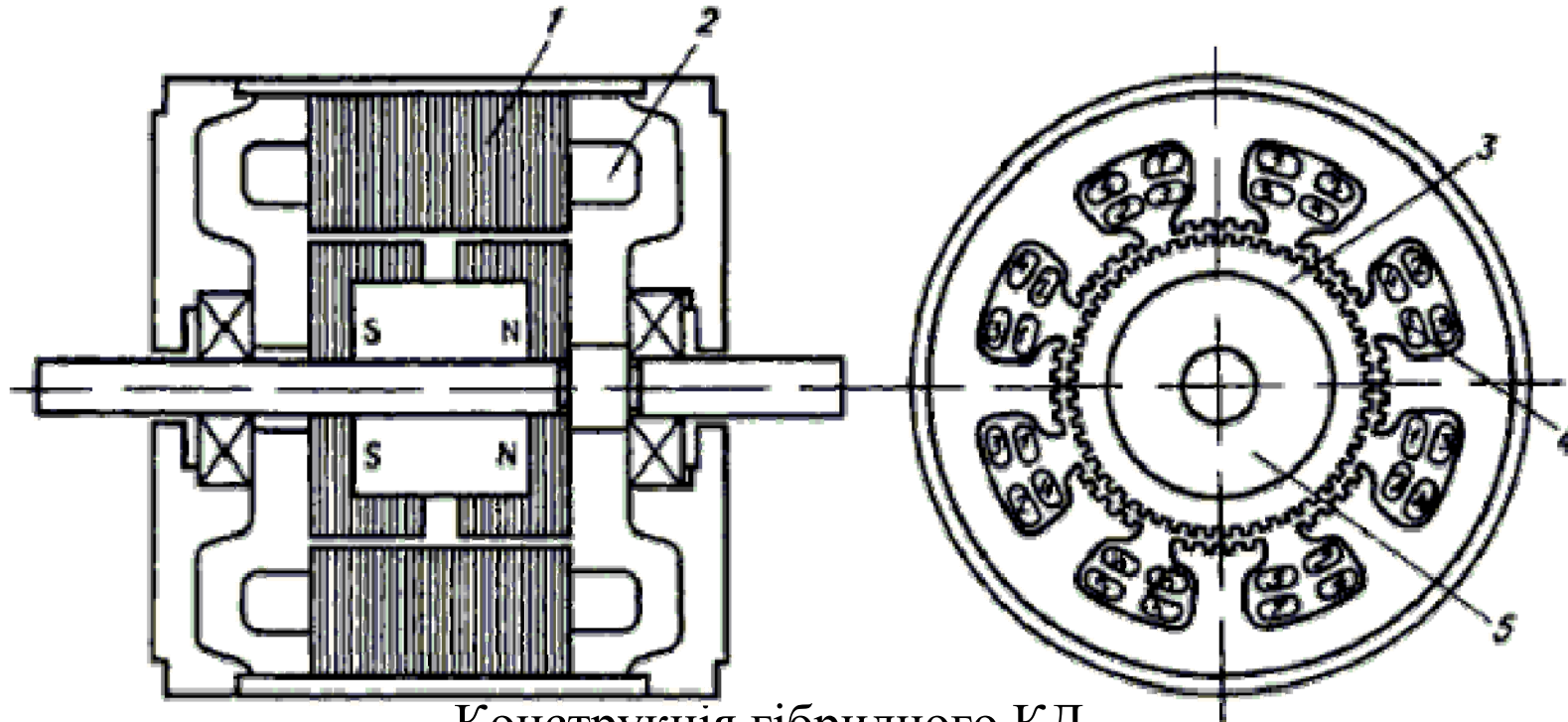
Конструкція ротора двигуна з постійними магнітами



Робота двигуна з постійними магнітами

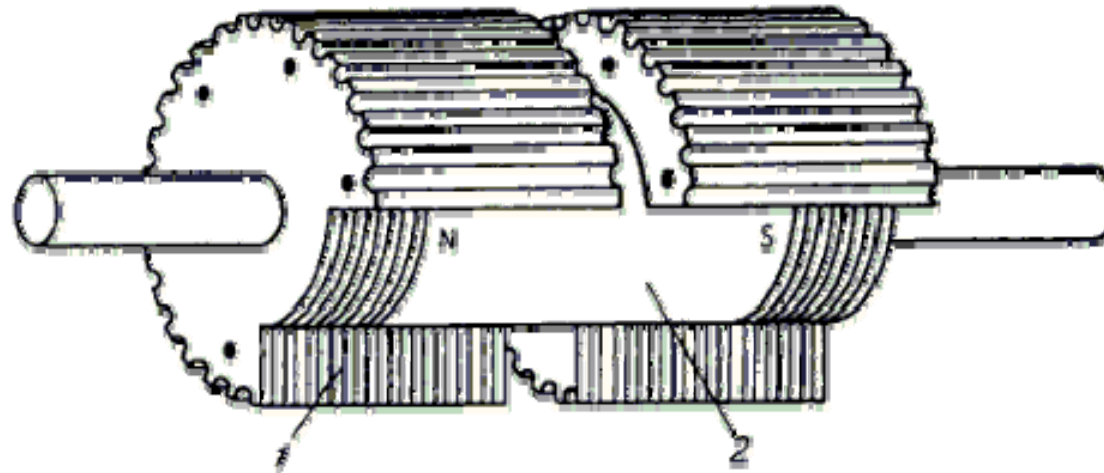
## Гібридні двигуни

У гібридного двигуна ротор розділений на дві частини, між якими розташований циліндричний постійний магніт. Зубці однієї половини ротора є північними полюсами, а зубці іншої половини - південними. Половини ротора повернені один відносно одного на половину кута кроку зубців. Число пар полюсів ротора дорівнює кількості зубців на одній з його половин.

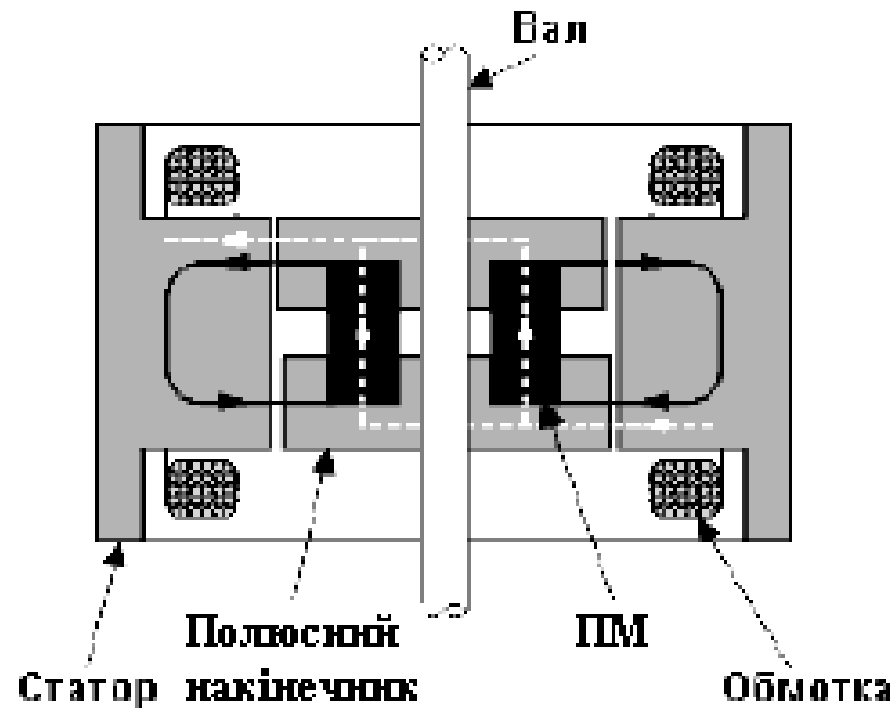


Конструкція гібридного КД

1 – магнітне осереддя статора; 2 – обмотки; 3 – магнітне осереддя ротора; 4 – обмотка статора; 5 – постійний магніт



Структура ротора гібридного КД: 1 – шихтоване магнітне осердя; 2 – постійний



Продольний розріз гібридного КД



Статор гібридного двигуна має зубці, що забезпечують велику кількість еквівалентних полюсів, на відміну від основних полюсів, на яких розташовані обмотки.

Залежність між числом полюсів ротора, числом еквівалентних полюсів статора і числом фаз визначає кут кроку  $\alpha$  двигуна:

$$\alpha = \frac{360}{N_{ph} \cdot P_h} = \frac{360}{N}$$

$N_{ph}$  – кількість полюсів ротора;  $P_h$  – кількість фаз;  $N$  – загальна кількість всіх фаз.

Частина потоку (чорні лінії) проходить через полюсні наконечники ротора, повітряні проміжок і полюсний наконечник статора. Ця частина не бере участь у створенні моменту.

Повітряні проміжки у верхнього і нижнього полюсного наконечника ротора різні. Це досягається завдяки повороту полюсних наконечників на половину зубцевого кроку. Існує інше магнітне коло яке містить мінімальні повітряні проміжки і має мінімальний магнітний опір. По цьому шляху замикається інша частина потоку (штрихована біла лінія), яка і створює момент. Частина шляху лежить в площині, перпендикулярній малюнку.

У цій же площині створюють магнітний потік котушки статора. У гібридному двигуні цей потік частково замикається полюсними наконечниками ротора. На відміну від двигунів постійного струму, магніт гібридного двигуна неможливо розмагнітити ні при якій величині струму обмоток.

Щоб магнітний потік не замикався через вал його виготовляють з немагнітних марок сталі. Для отримання великих моментів необхідно збільшувати як поле, створюване статором, так і поле постійного магніту. При цьому потрібно більший діаметр ротора, що погіршує відношення обертового моменту до моменту інерції. Тому потужні крокові двигуни іноді конструктивно виконують з декількох секцій.

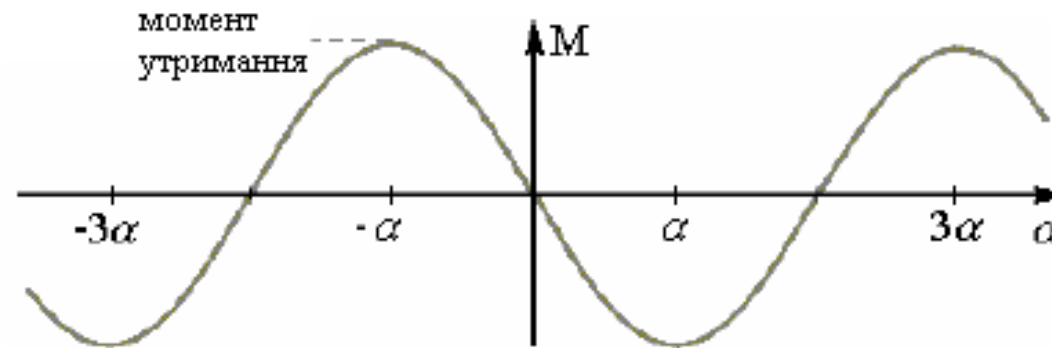
### **Способи управління кроковим двигуном**

Розрізняють:

- Повнокроковий режим без перекриття фаз;
- Повнокроковий режим з перекриттям фаз;
- Напівкроковий режим;
- Мікрокроковий режим;

**Повнокроковий режим** без перекриття фаз. У цьому режимі в один момент часу отримує живлення тільки одна фаза двигуна. Полюса ротора прагнуть зайняти положення навпроти обмотки, що живиться, залежно від напрямку протікання струму в ній. Недоліком даного способу є менший момент двигуна.

**Повнокроковий режим з перекриттям фаз.** Характерною рисою даного режиму є те, що одночасно отримують живлення дві суміжні фази і ротор зупиняється не навпроти полюсів, а в проміжному положенні між ними. Даний спосіб комутації фаз забезпечує в  $\sqrt{2}$  більший момент. При зупинці двигуна важливо не знеструмлювати його обмотки, щоб двигун забезпечував повний момент, бо може статися зсув ротора на половину кроку і відповідно втрата положення.

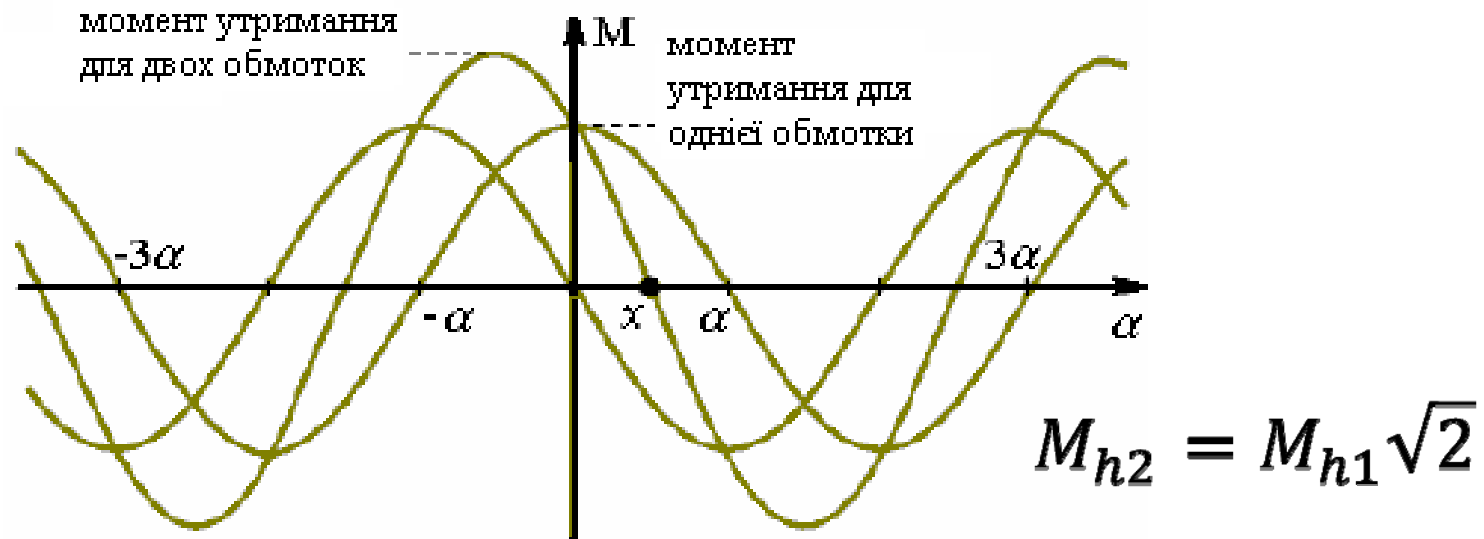


Залежність моменту від кута поворота при ввімкненні однієї

Формула, що описує залежність моменту від кута повороту ротора, має такий вигляд:

$$M = -M_h \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot \alpha} \varphi\right)$$

$M$  – момент КД;  $M_h$  – момент утримання;  $\alpha$  – кут кроку;  $\varphi$  – кут повороту ротора.



Залежність моменту від кута поворота ротора при живленні двох обмоток

**Напівкроковий режим** є комбінацією двох вищезазначених, тобто ротор зупиняється як навпроти полюсів, так і в проміжному положенні між ними. З одного боку це дозволяє зменшити крок у два рази, з іншого будуть мати місце коливання моменту. Однією з проблем напівкрокового режиму є перехід в стан з однією включеною фазою. Справа в тому, що потрібно якомога швидше звести в фазі, що вимикається, струм до нуля. Наприклад, використовуючи Н-міст, це здійснюється вимиканням всіх ключів, що призводить до того, що великий розрядний струм тече через діоди і джерело живлення. Якщо ж залишити один ключ замкненим, то контур розряду буде включати в себе діод і ключ, тому струм буде спадати повільніше.

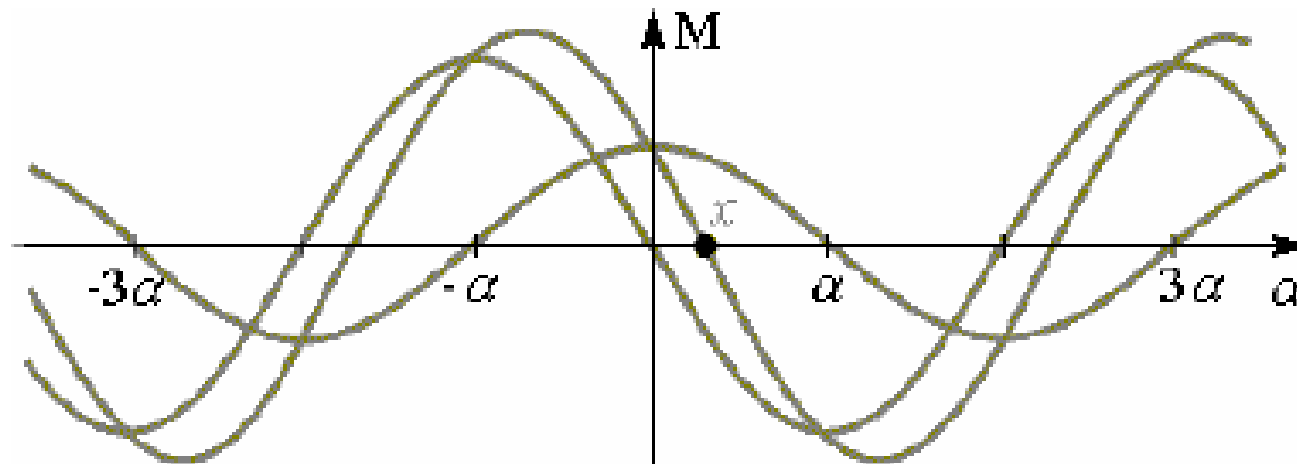
Недоліком покрокового режиму є досить значне коливання моменту від кроку до кроку. У тих положеннях ротора, коли живиться одна фаза, момент складає приблизно 70% від повного, коли живляться дві фази. Ці коливання можуть бути причиною підвищених вібрацій і шуму, хоча вони все одно залишаються меншими, ніж в повнокроковому режимі.

**Мікрокроковий режим.** Напівкроковий режим є окремим випадком мікрокрокового. Змінюючи співвідношення струмів у фазах двигуна, можна досягти будь-якого положення ротора між сусідніми полюсами.

Якщо одночасно подати живлення на дві обмотки двигуна, і струми в цих обмотках не рівні (див. рис.), то результуючий момент буде  $M_h = \sqrt{M_a^2 + M_b^2}$ , а точка рівноваги ротора зміститься в точку:

$$x = \frac{2\pi}{\alpha} \arctan\left(\frac{M_b}{M_a}\right)$$

де:  $M_a$ ,  $M_b$  – момент, створений першою і другою фазою;  $x$  – положення рівноваги ротора.



Залежність моменту від кута повороту ротора при різних значеннях струмів в фазах

Зсув точки рівноваги ротора говорить про те, що ротор можна зафіксувати в будь-якій довільній позиції. Для цього потрібно лише правильно встановити відношення струмів в фазах. Саме цей факт використовується при реалізації **мікрокрокового режиму**.

Там, де потрібні відносно малі переміщення і висока роздільна здатність, мікрокроковий режим здатний замінити механічний редуктор. Іноді мікрокроковий режим використовується для збільшення точності величини кроку понад заявлену виробником двигуна.