جامعة المنارة
قسم هندسة الميكاترونكس

الآلات الكهربائية
Electrical Machines

7

الدكتور المهندس
علاء الدين أحمد حسام الدين

مفردات المقرر

- مفاهيم عامة في الآلات الكهربائية.
- المحولات الكهربائية.
- آلات التيار المستمر.
- مبادئ عامة في آلات التيار المتناوب.
- الآلات التحريضية ثلاثية الأطوار.
- محركات الخطوة.
- محركات السيرفو.

جَامعة المَنارة
MANARA UNIVERSITY

محركات الخطوة

STEPPER MOTORS

محركات الخطوة هي محركات مقادة رقمياً بلا فحمات. تدور ملفاتها خطوة واحدة (أو عدد محدد من الدرجات) لكل نبضة تطبق عليها. فمحرك الخطوة منفذ كهرومغناطيسي يقوم بتحويل الأوامر التي يتلقاها (نبضات) إلى عدد من الخطوات الزاوية المكافئة.

رمز المحرك:

زاوية الخطوة (الخطوة الزاوية) هي الزاوية التي يدور دوار المحرك وفق قيمتها وذلك لكل نبضة أمر، ويرمزلها بالرمز β.

كلما كانت زاوية الخطوة أصغر، كلما زاد عدد الخطوات لكل دورة، وكلما زادت دقة تحديد المواقع التي يمكن الحصول عليها من المحرك. يمكن أن تكون زوايا الخطوة صغيرة (0.72º) أو كبيرة حتى (90º)، إلا أن مقدار زوايا الخطوة الأكثر شيوعاً هي 15º , 7.5º , 2.5º , 1.8º.

0.72º	أي 500 خطوة في الدورة الواحدة
0.9º	أي 400 خطوة في الدورة الواحدة
1.8º	أي 200 خطوة في الدورة الواحدة
2º	أي 180 خطوة في الدورة الواحدة
2.5º	أي 144 خطوة في الدورة الواحدة
5º	أي 72 خطوة في الدورة الواحدة
7.5º	أي 48 خطوة في الدورة الواحدة
15º	أي 24 خطوة في الدورة الواحدة
30º	أي 12 خطوة في الدورة الواحدة
90º	أي 4 خطوات في الدورة الواحدة

تتغير زاوية خطوة المحرك أو زاوية انتقال المحور تبعاً لبنية المحرك الداخلية، لكنها محصورة بشكل عام بين 0.72º و 90º وفق الآتي:

يمكن التعبير عن قيمة زاوية الخطوة إما من خلال عدد أقطاب (أسنان) الدوار Nr وعدد أقطاب (أسنان) الثابت Ns، أو من خلال عدد أطوار الثابت m وعدد أقطاب (أسنان) الدوار.

$$\text{if } Ns > Nr \Rightarrow \beta = \frac{(N_S - N_r)}{N_S \cdot N_r} \times 360^o$$

$$\text{if } Ns < Nr \Rightarrow \beta = \frac{(N_r - N_s)}{N_S \cdot N_r} \times 360^o$$

أو

$$\beta = \frac{360^o}{m \cdot N_r}$$

مثلاً إذا كانت Ns=8 و Nr=6 فإن زاوية الخطوة تساوي:

$$\beta = \frac{(8-6)}{8 \times 6} \times 360^o = 15^o$$

يتم تحديد الدقة (عدد الخطوات التي يقوم بها المحرك خلال دورة واحدة) من خلال عدد الخطوات اللازمة لإتمام دورة واحدة من محور الدوار، وكلما زادت الدقة، كلما زادت دقة تحديد موضع الأشياء بواسطة المحرك.

$$\text{الدقة Resolution} = \frac{\text{عدد درجات الدورة كاملة}}{\text{زاوية الخطوة}} = \frac{360^{o}}{\beta}$$

يتمتع المحرك الخطوي بقدرة استثنائية على العمل بمعدلات خطوة عالية جداً تصل إلى 20000 خطوة في الثانية في بعض المحركات، ومع ذلك يبقى متو افقاً تماماً مع الأوامر النبضية. عندما يكون معدل النبضات مرتفعاً يبدو دوران محرك المحرك مستمراً، وتسمى العملية في هذه الحالة (دوران المحرك)، ويصدر المحرك في هذه الحالة صوتاً مسموعاً بتردد أساسي يساوي معدل الخطوة. فإذا فرضنا أن f هو تردد الخطوة (معدل النبضات) [PPS] وأن ß هي زاوية الخطوة، تكون سرعة دوران محور المحرك تساوي دقة تردد النبضة، وتساوي:

$$n = \frac{\beta \times f}{360^{o}} \ [rps]$$

إذا تمت زيادة معدل الخطوة بسرعة كبيرة، يفقد المحرك التو اقت، ويتوقف، ويحدث نفس الأمر إذا توقفت نبضات الأوامر فجأة أثناء دوران المحرك بدلاً من إبطائها تدريجياً.

تصمم المحركات الخطوية للعمل لفترات زمنية طويلة بحالة توقف الدوارفي وضع ثابت، وسريان التيارفي ملفات الثابت، وهذا يعني أن التوقف لا يمثل مشكلة بالنسبة لمثل هذه المحركات، كما هو الحال بالنسبة لمعظم المحركات الأخرى، حيث تسبب هذه الحالة إلى انعدام القوى المحركة الكهربائية، وسريان تياركبيرجداً، الأمرالذي قد يؤدي إلى احتراق سريع للمحرك.

مسألة 1:

محرك خطوي له 8 أقطاب رئيسية لكل قطب 5 أسنان. فإذا علمت أن للدوار 50 سن، احسب زاوية الخطوة.

$$N_r=50 \quad , \quad N_s=8\times5=40$$

$$\beta = \frac{(N_r - N_s)}{N_S \cdot N_r} \times 360^o = \frac{(50-40)}{50 \times 40} \times 360^o = 1.8^o$$

مسألة 2:

محرك خطوي زاوية الخطوة فيه 2.5^o. احسب: الدقة ، عدد الخطوات المطلوبة إجراء 25 دورة، سرعة دوران المحور إذا كان تردد الخطوة 3600 نقطة بالثانية.

$$\text{الدقة} = \frac{\text{عدد درجات الدورة كاملة}}{\text{زاوية الخطوة}} = \frac{360^o}{\beta}$$

$$\text{الدقة Resolution} = \frac{360^o}{\beta} = \frac{360^o}{2.5^o} = 144\ [\text{step/revolution}]$$

عدد الخطوات المطلوبة لإجراء 25 دورة = $144 \times 25 = 3600$steps.

سرعة دوران المحور: $n = \frac{\beta \times f}{360^o} = \frac{2.5 \times 3600}{360^o} = 25[\text{rps}]$

بإمكان محرك الخطوة أن يدور دورة كاملة (360º) أو يقوم بعدد من الدورات في الدقيقة، لكنه يتميز عن محركات التيار المستمر التقليدية بسرعة دوران منخفضة نسبياً.

تتميز محركات الخطوة بتوليدها عزوماً كبيرة عند السرعات المنخفضة مقارنة مع محركات التيار المستمر التقليدية والمحركات الأخرى، مما يجعلها أكثر ملاءمة للاستعمال في التجهيزات التي تحتاج إلى تحكم دقيق جداً في الموضع عند السرعات المنخفضة.

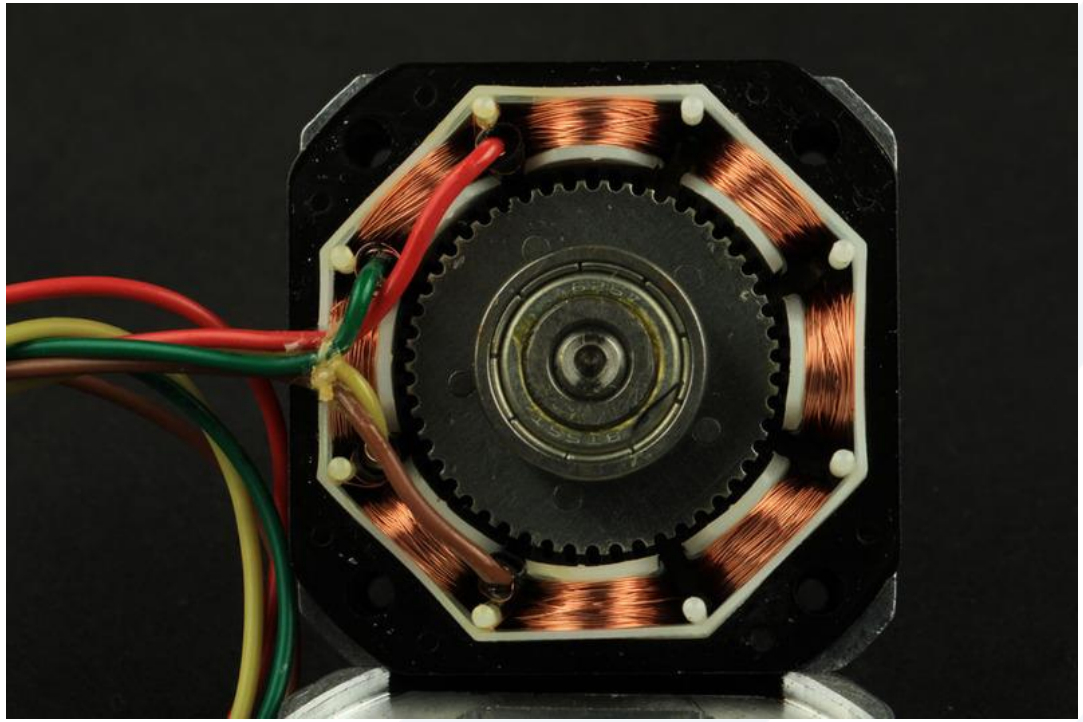
تستعمل محركات الخطوة في الطابعات لسحب الورق، وفي الراسمات الثنائية الاحداثيات X-Y، وفي سواقات الأقراص في أجهزة الكومبيوتر، وفي الروبوتات، وفي تقنيات تحسس الموضع....وغيرها.

كما تستعمل في منظمات الحركة لتميزها بالعمل في دارات التحكم المفتوحة بدون تغذية عكسية. تغذى هذه المحركات بإشارات نبضية، مما يسمح للدوار بالانتقال خطوة محددة، أو الدوران بزاوية محددة، أو التوقف في المكان المحدد تحت تأثير الحمولة على محور المحرك. ويعد اختيار محركات الخطوة اقتصادياً في كثير من الحالات، وخاصة في الحالات التي لا تتطلب تسارعاً عالياً ولا سرعات عالية أو توقف دقيق في الموضع.

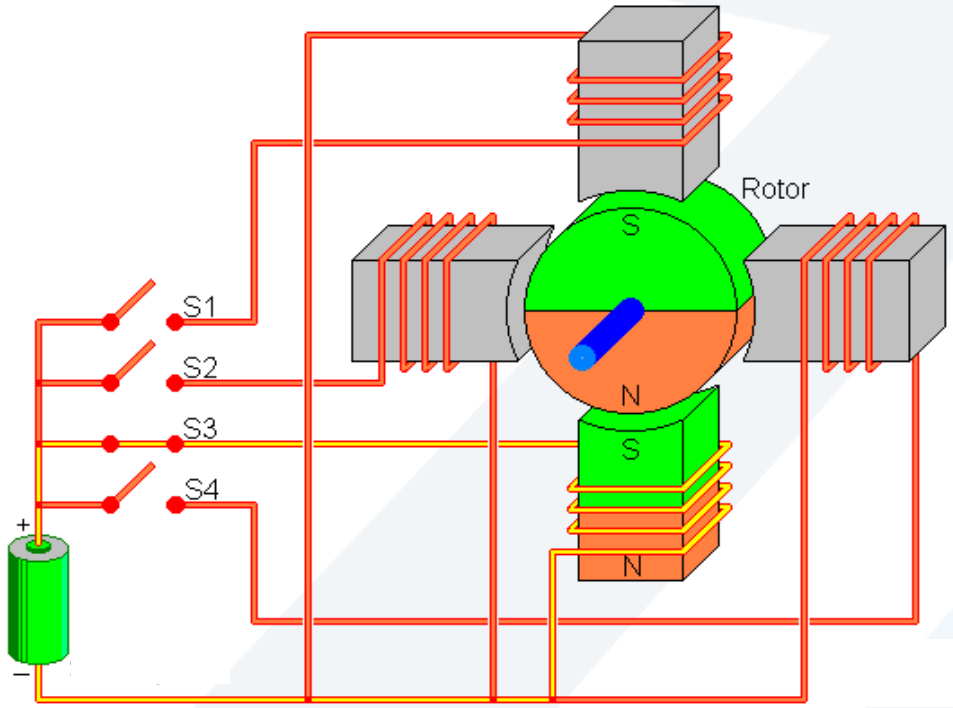
تتغذى محركات الخطوة من منبع تيار مستمر، وتحتاج إلى دارة تحكم رقمية مع مؤقت للتحكم بتعاقب تغذية الملفات الموجود على أقطار الثابت.

لا تتعدى استطاعة محرك الخطوة غالباً كيلوواط واحد، ولهذا تستعمل مثل هذه المحركات بشكل واسع في أنظمة التحكم بالموضع منخفضة الاستطاعة.

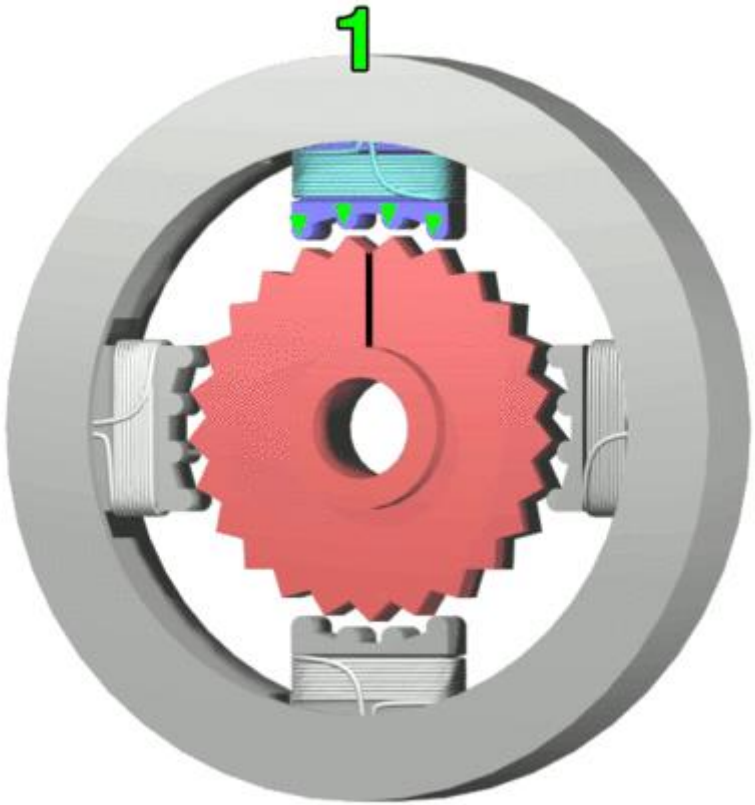
يبين الشكل مقطعاً عرضياً في محرك خطوة



يتألف محرك الخطوة كأي محرك من جزأين رئيسيين: جزء ثابت وجزء دوار. يبين الشكل محرك خطوي أحادي القطب.



لعكس اتجاه الدوران يكفي فقط أن نعكس تسلسل الأقطاب المغذاة (أي نعكس اتجاه قطار النبضات).



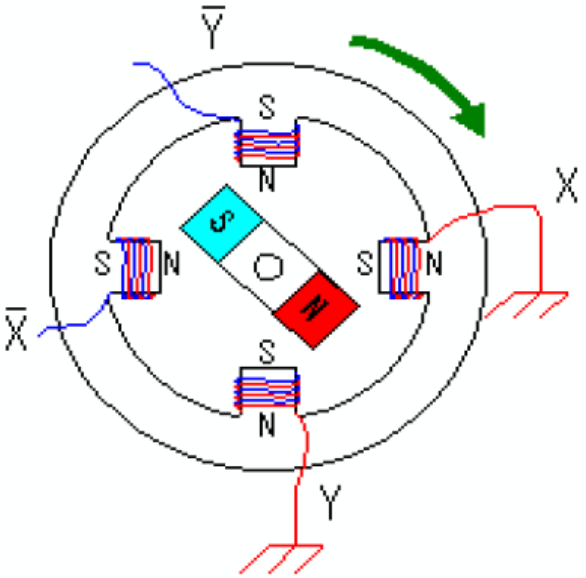
يعمل محرك الخطوة على مبدأ الكهرومغناطيسية (electromagnetism) فهو يحتوي على جزء دوار (مغناطيسي أو من الحديد اللين), محاط بملفات كهرومغناطيسية ثابتة, وكلاهما لديه اقطاب (وقد تحتوي على أسنان أو بدون حسب نوع المحرك).

عند تفعيل احد هذه الملفات (بتمرير تيار عبرها), يتحرك الجزء الدوار ليُحاذي الاقطاب المفعلة. لذلك يجب تطبيق نبضات بترتيب وتسلسل معين على هذه الملفات لنحصل على حركة منتظمة.

يتميز هذا المحرك أيضاً أنه يعتمد على النظام الثنائي في التشغيل ، حيث يخرج منه عدد أسلاك (4-5) تسمح له بتلقي تتابع معين. فمثلاً إذا استقبل التتابع 0001 التي تكافئ 1 في النظام العشري فإنه سيتحرك بزاوية مقدارها 90° في اتجاه معين، أما في حال استقبال 1000 التي تكافئ 8 في النظام العشري فإنه يدورفي الاتجاه المعاكس.

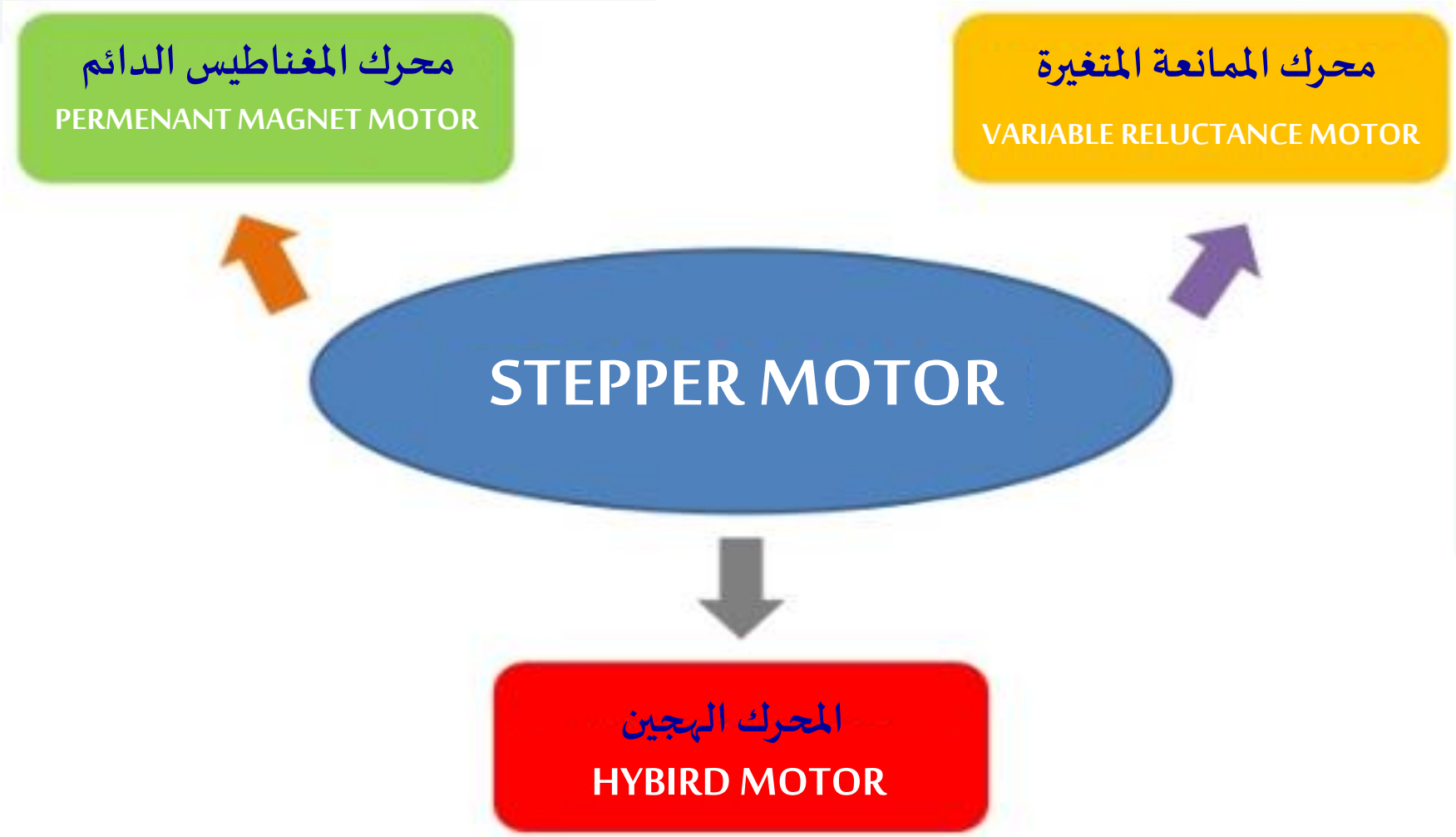
يعني إذا أردت تحريك المحرك باتجاه معين (عكس عقارب الساعة مثلاً) ترسل له التتابع التالي:

(0001 – 0010 – 0100 – 1000)، وإذا ارسلنا عكس هذا التتابع سنحصل على الاتجاه المعاكس، وهذه الطريقة تعرف باسم أحادية القطب.



X	X̄	Y	Ȳ
0	1	0	1
1	0	0	1
1	0	1	0
0	1	1	0

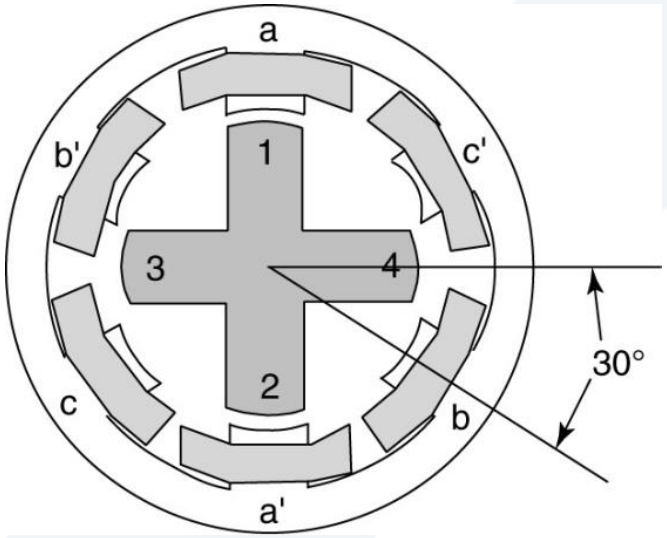
أنواع محركات الخطوة:

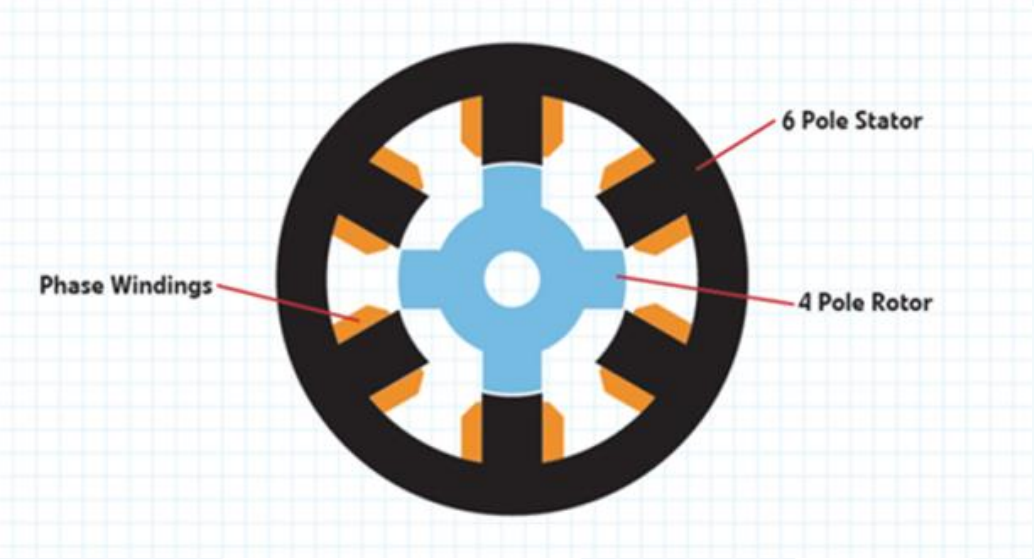


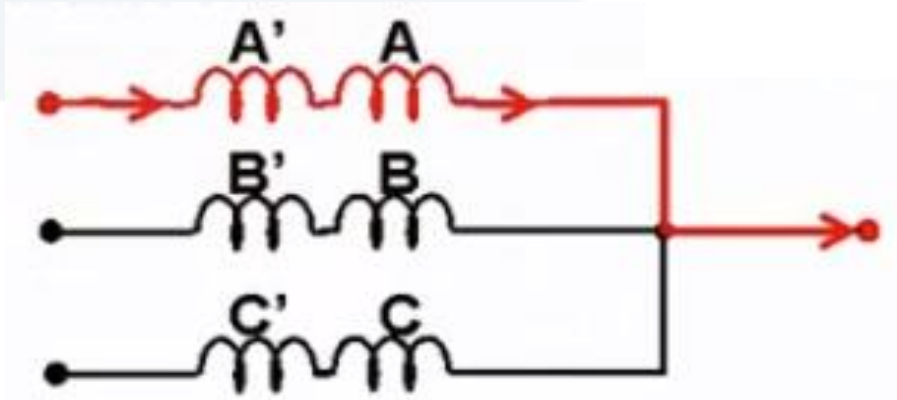
1. محرك الممانعة المتغيرة:

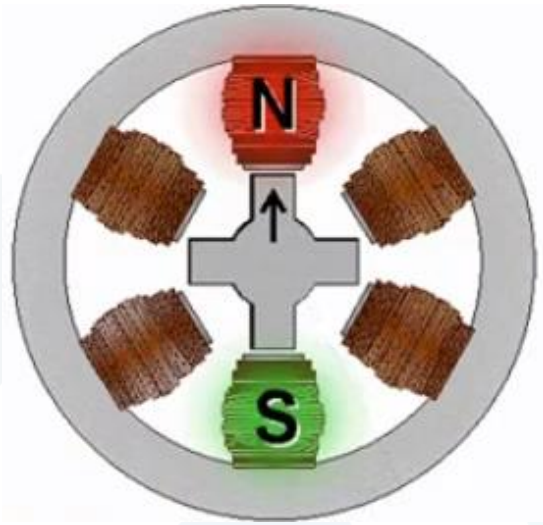
Variable-Reluctance stepper motor

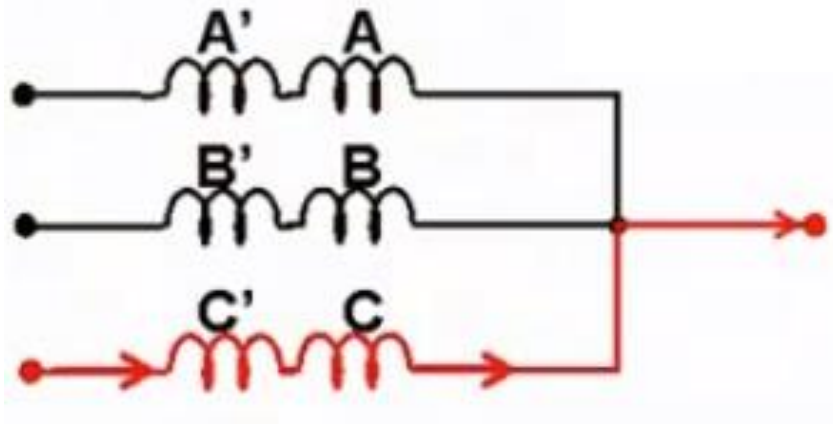
يبين الشكل محرك خطوة متغير الممانعة خطوته 30º. يتألف هذا المحرك من جزء ثابت عليه ستة أقطاب مصنوعة من مادة كهرومغناطيسية توجد عليها وشائع. أما الجزء الدوار فتوجد عليه أربعة أسنان بارزة مصنوعة من مادة كهرومغناطيسية من دون ملفات. تصنع المحركات ذات الخطوة الأصغروالأدق بعدد ملفات أكبرفي الجزء الثابت، وبعدد أسنان أكبرفي الدائر.

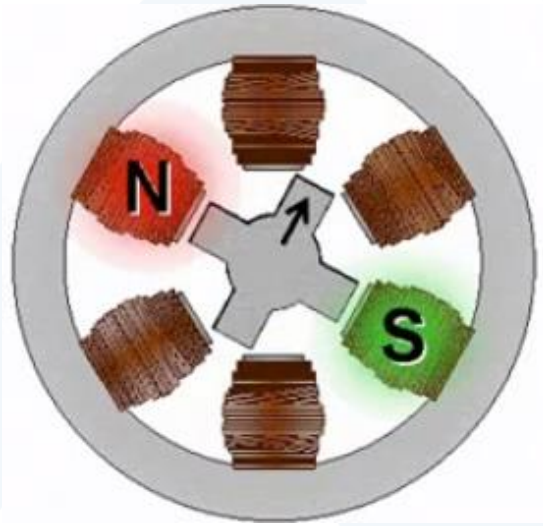





A'
A
B'
B
C'
C


N
S


A'
A
B'
B
C'
C


N
S

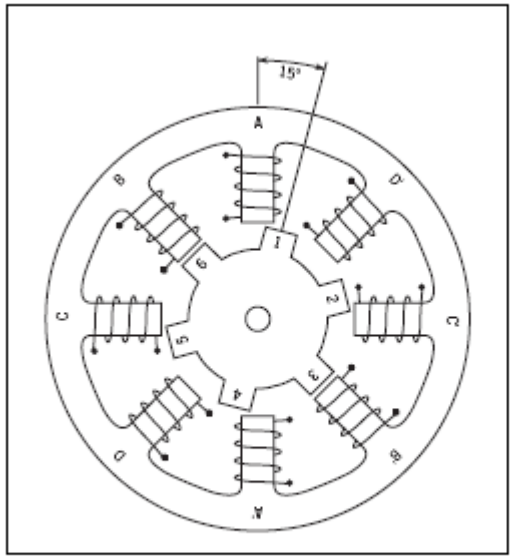


Figure 1. Cross-section of a variable-reluctance (VR) motor.

في هذه المحركات يكون الدوار مصنوع من الحديد الطري ويكون مسنن ومحاط بأسنان الثابت التي تلف عليها الوشائع كما في الشكل (1)

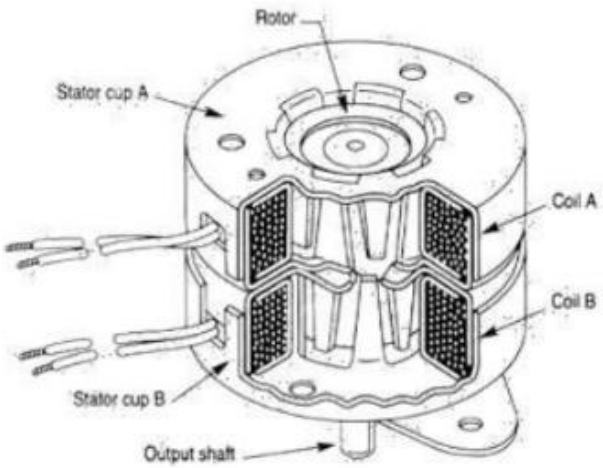
وعندما تتغذى إحدى الوشائع بالتيار الكهربائي المستمر فإنها تتحول إلى مغناطيس تجذب بدورها السن القريب منها نلاحظ أن عدد أسنان الدوار يختلف عن الثابت وفي معظم المحركات يكون عدد أسنان الدوار أقل بسنين حيث يستفاد من الفروق الزاوية بين الثابت والدوار من أجل التحكم بزاوية الخطوة .

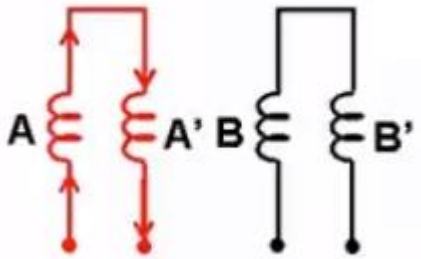
2. محرك الخطوة بمغناطيس دائم:

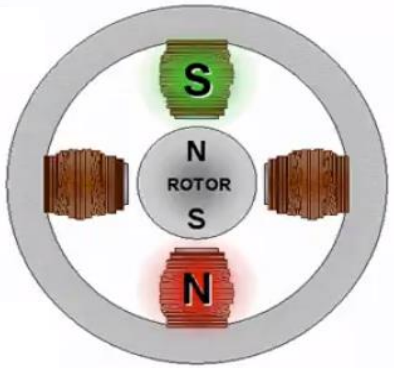
Permanent Magnet stepper motor

لا يختلف الجزء الثابت لهذه المحركات عن الجزء الثابت لمحركات الممانعة المتغيرة. الجزء الدوار مؤلف من أسنان بارزة يشكل كل منها قطباً مصنوعاً من مادة مغناطيسية (مغناطيس ثابت) وبحيث تكون الأقطاب المتجاورة المختلفة.

محركات المغناطيس الدائم يمكن أن تكون إما ثنائية القطبية (الاتجاه)، وهي تلك التي تتغذى من منبعي قدرة متعاكسي القطبية، أو من منبع قدرة وحيد قادر على عكس قطبيته، أو أحادية القطبية (الاتجاه) وهي تلك التي تتغذى من منبع قدرة واحد وحيد القطبية فقط.



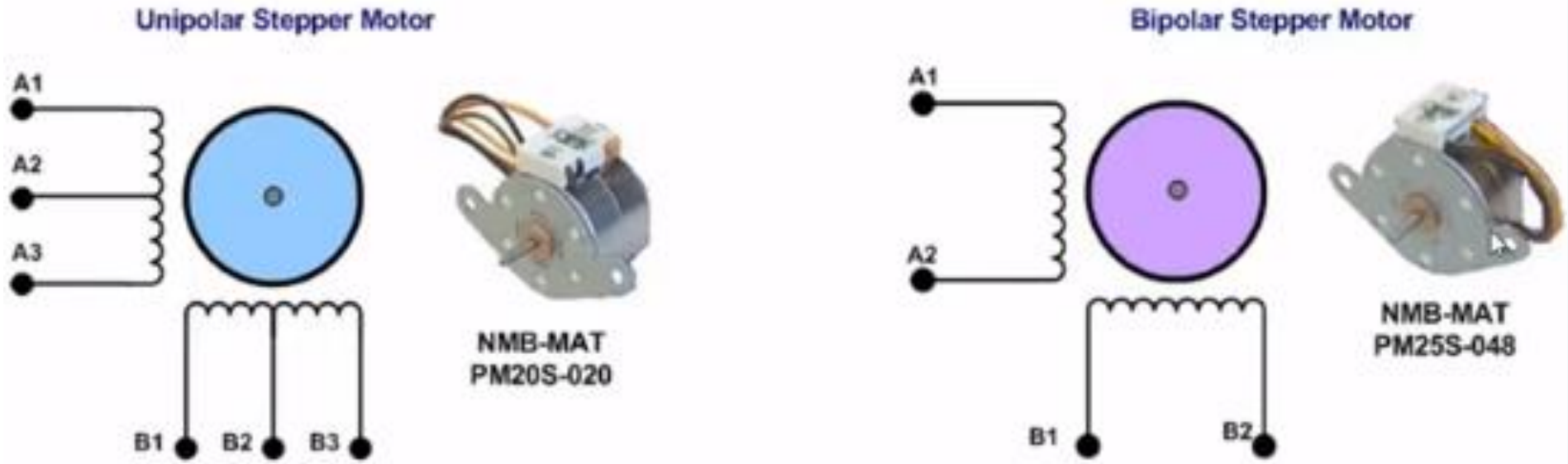




لمحرك المغناطيس الدائم نوعان:

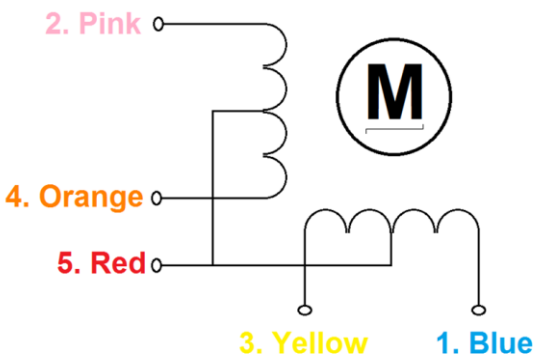
أحادي القطبية: Unipolar Stepper

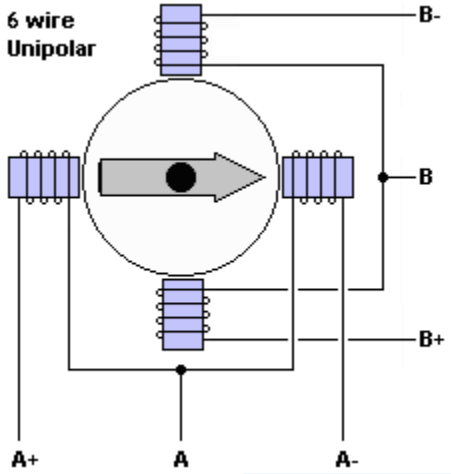
ثنائي القطبية: Bipolar Stepper

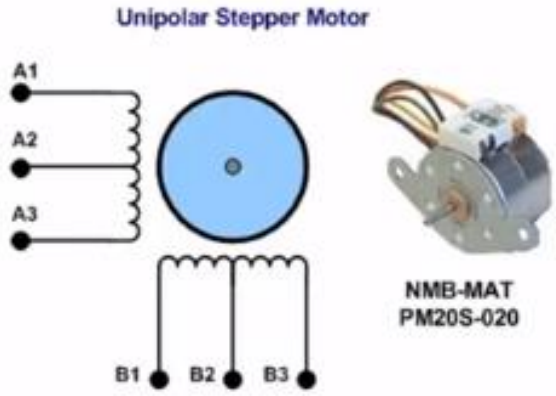


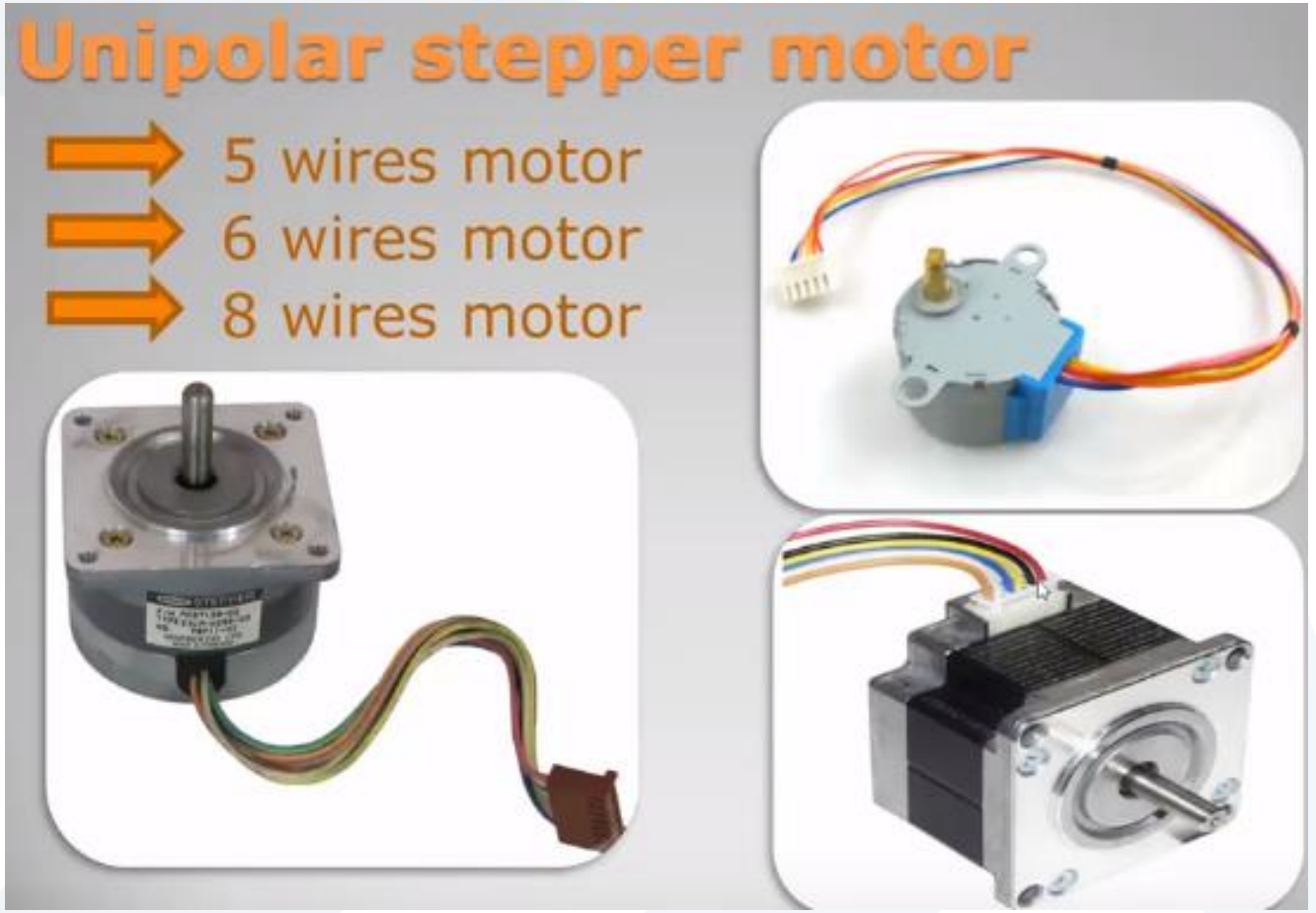
The Unipolar and Bipolar Stepper Motor Windings

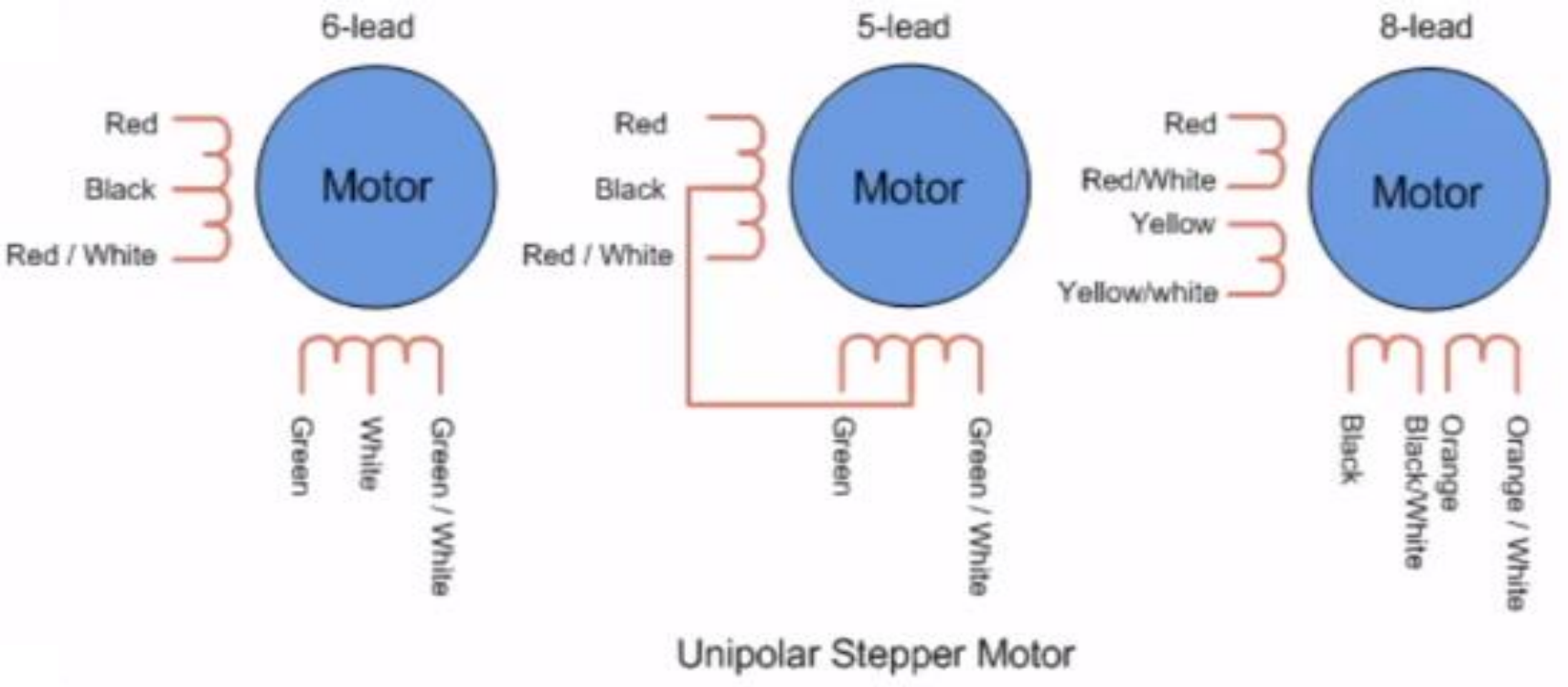
الأحادي القطبية: يتألف من أربعة أقطاب في الثابت، أوزوجين من الملفات بنقطة مشتركة لكل منها. أما الدائر فيتألف من ستة أسنان بارزة يشكل كل منها قطب من مغناطيس دائم. يمكن أن توصل النقطتان المشتركتان للملفين داخل جسم المحرك بنقطة واحدة، وبذلك يخرج من المحرك خمسة أسلاك توصيل، أو تؤخذ النقطتان المشتركتان خارجاً، وبذلك يكون عدد الأسلاك الخارجة من المحرك ستة أسلاك.



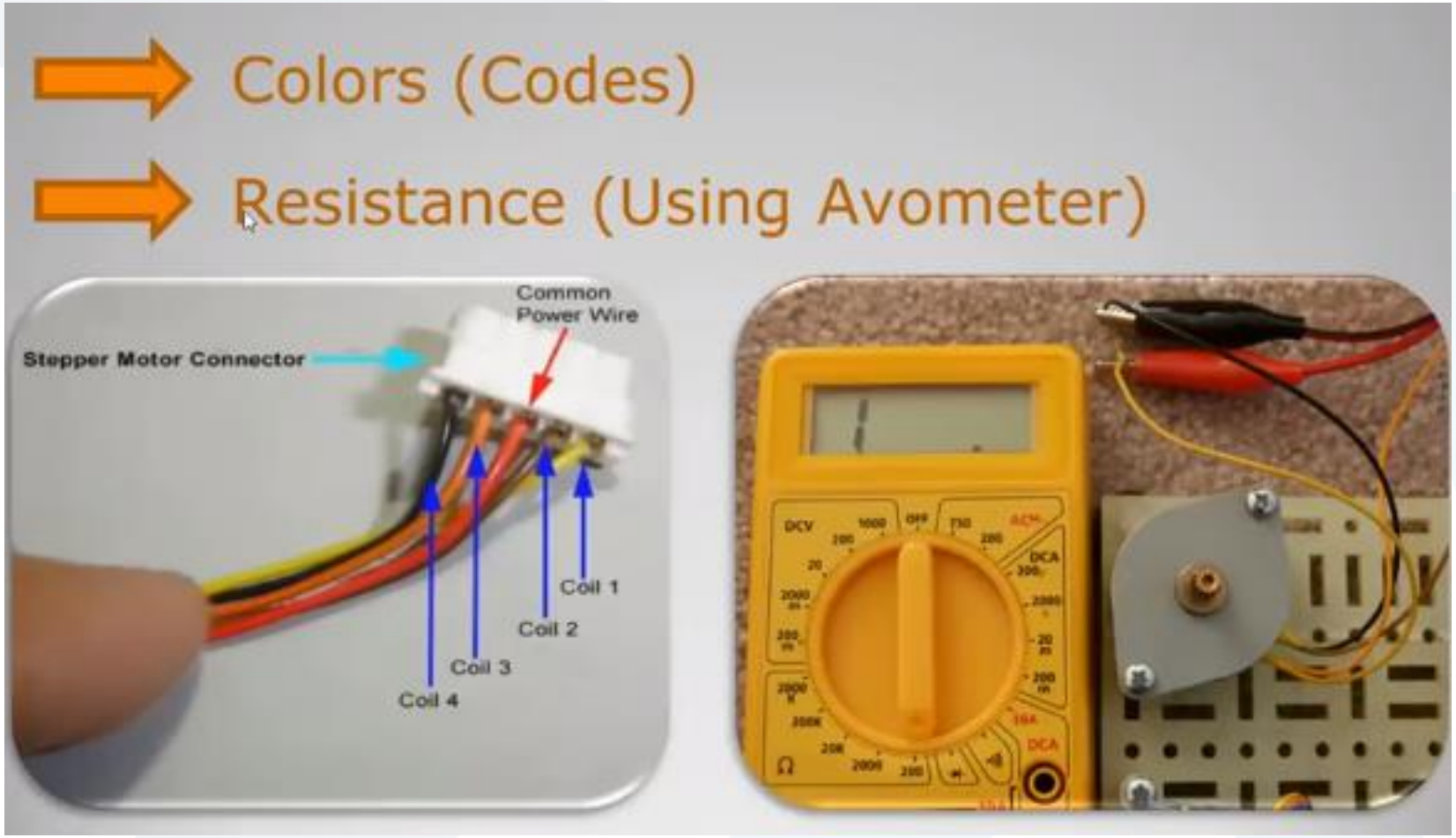


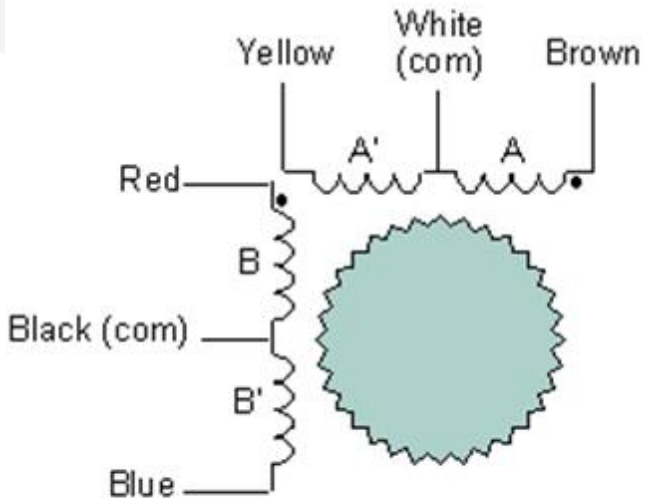



Unipolar stepper motor
5 wires motor
6 wires motor
8 wires motor

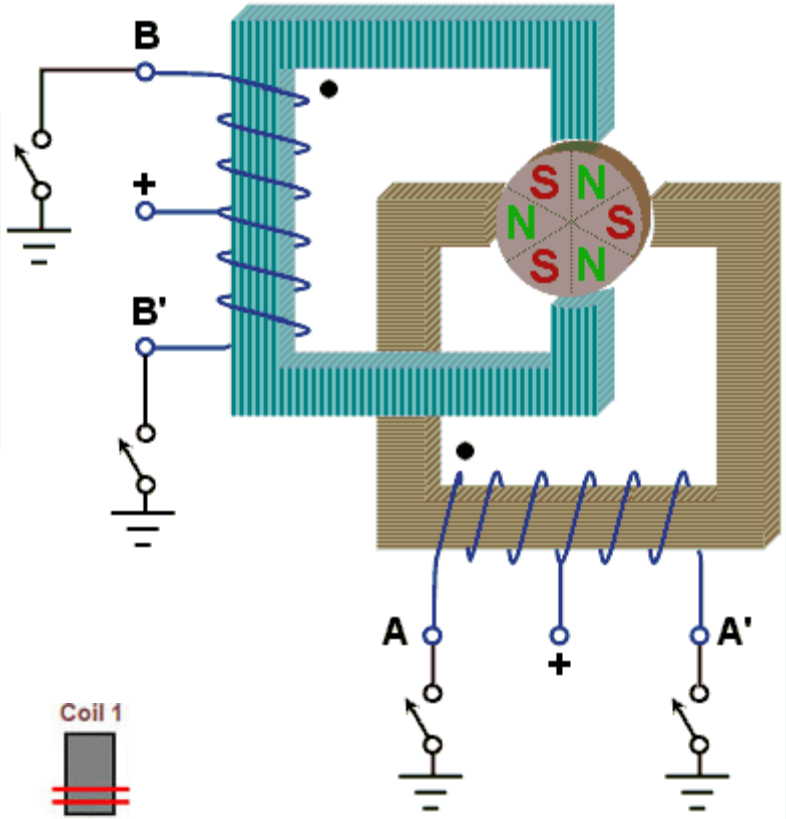


Unipolar Stepper Motor

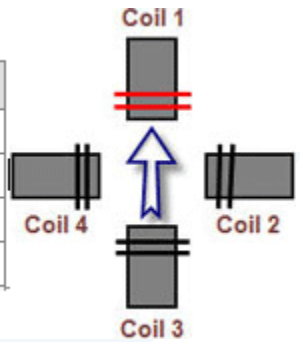

Colors (Codes)
Resistance (Using Avometer)
Common
Power Wire
Stepper Motor Connector
Coil 1
Coil 2
Coil 3
Coil 4



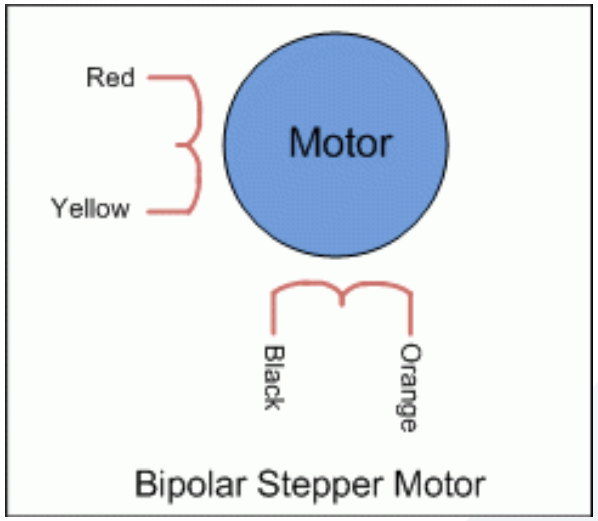
Phase Order A, B, A', B', ...

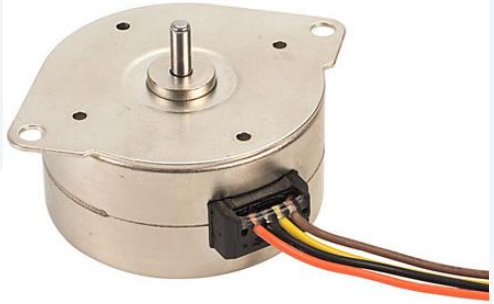


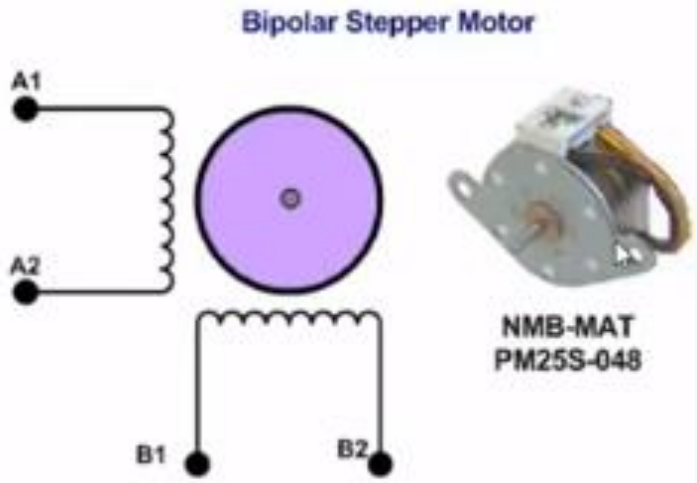
Pulse	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1



الثنائي القطبية: تشبه محركات الخطوة الأحادية القطبية، لكن ملفاتها لا تحتوي على نقطة مشتركة. ولتغذية المحرك توصل أطراف الملفات إلى الدارة الرقمية ليتم تغذيتها وفق تعاقب محدد. يتم وصل طرفا الملف بالتناوب مع منبع الجهد ومع الأرضي.

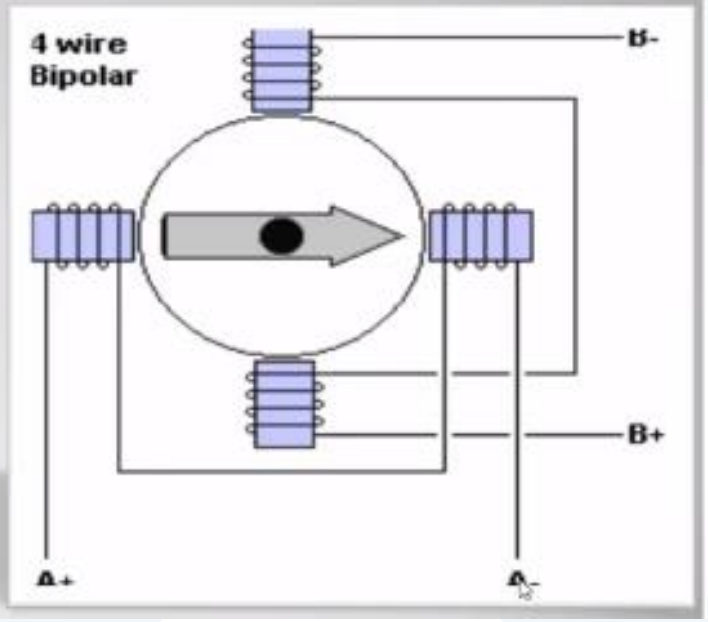






Bipolar stepper motor

4 wires motor



2. محرك الخطوة بمغناطيس دائم:

Permanent Magnet stepper motor

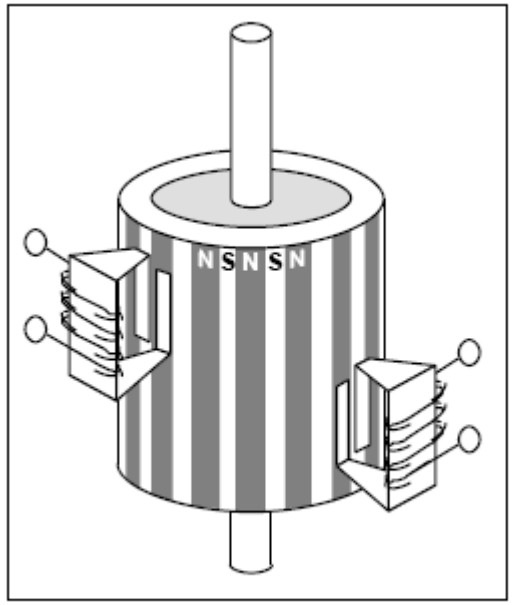


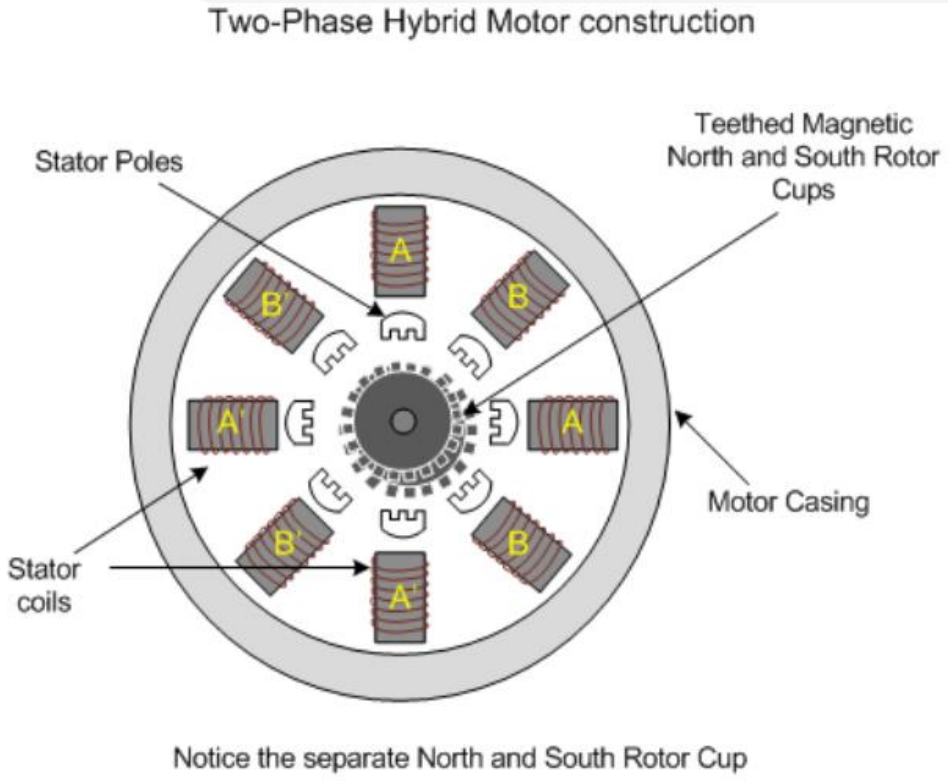
Figure 2. Principle of a PM or tin-can stepper motor.

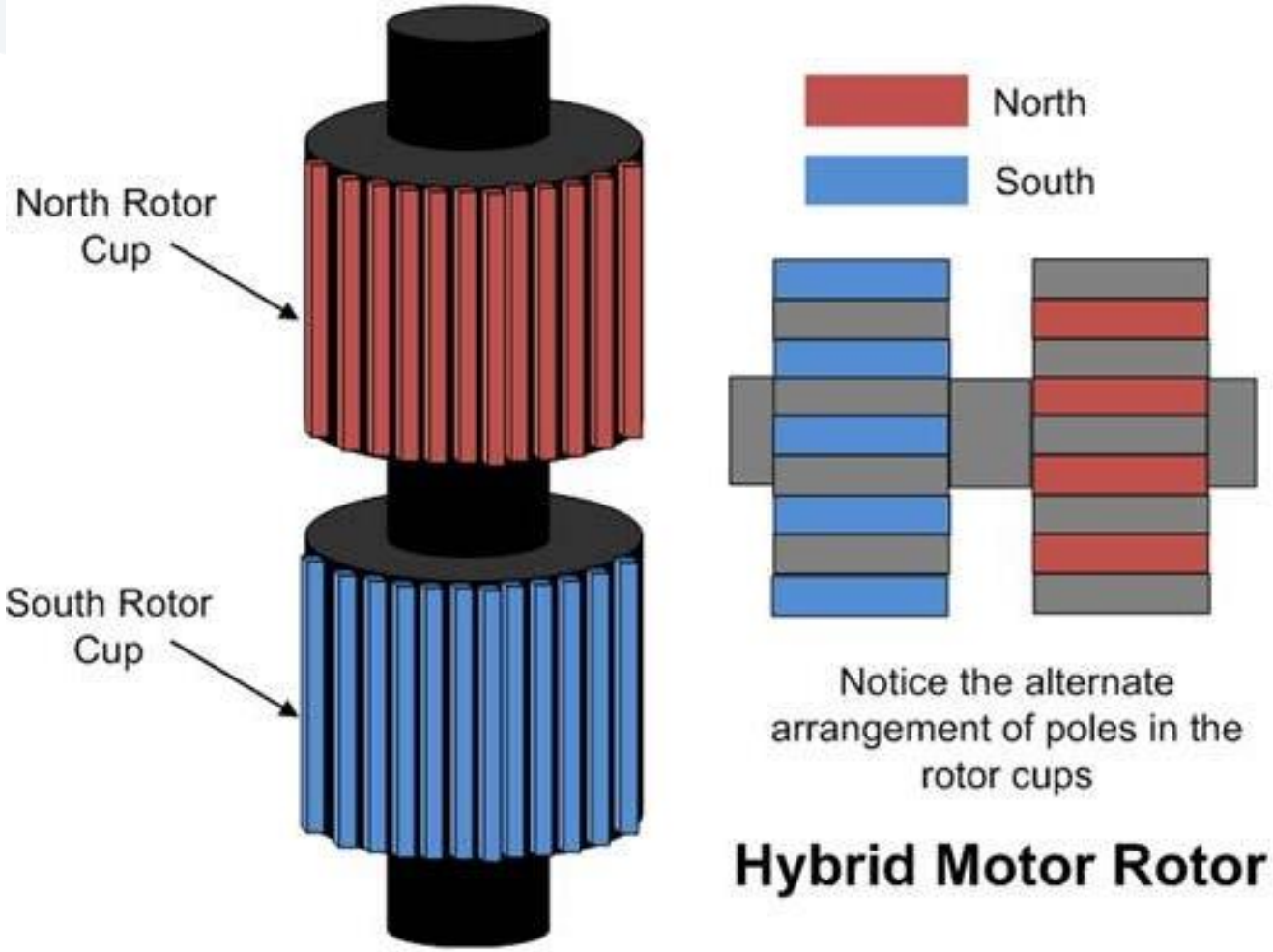
يكون فيها الدوار عبارة اسطوانة غير مسننة وتتألف من مجموعة من المغانط الدائمة التي تتابع فيها أقطابها بشكل متناوب كما في الشكل(2) وتمتاز هذه المحركات بأن زاويتها الخطوية كبيرة نسبياً من 7.5 إلى 15 درجة إلا أن مميزة (السرعة - عزم) جيدة

3. محرك الخطوة الهجين:

Hybrid stepper motor

هذا النوع من المحركات هو خليط من النوعين السابقين, فهو يحتوي على محور دوران ممغنط مع اسنان، مما يعطي توجيه افضل للمجال المغناطيسي في الفراغ.

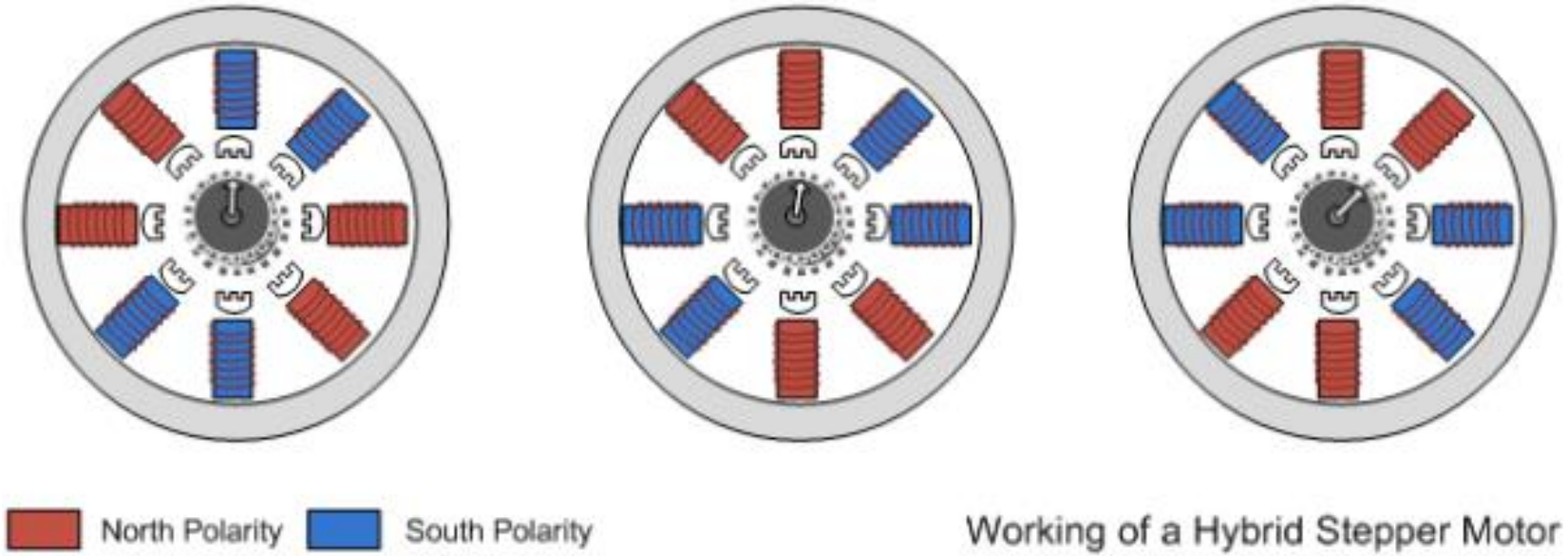




و الجزء الدوار (المغنط) يتكون من جزأين (Cups) احداهما للقطب الشمالي والآخر للقطب الجنوبي .

يبين الشكل محرك خطوة بثمانية ملفات

وتعتمد حركة هذا النوع على تسلسل النبضات أيضاً.



Working of a Hybrid Stepper Motor

خصائص محركات الخطوة ذات المغناطيس الدائم:

الدقة (عدد الخطوات المنجزة في الدورة): $N_P = k_1 \cdot k_2 \cdot m \cdot p$

$k_1 = 1$ تبديل أحادي القطبية

$k_1 = 2$ تبديل ثنائي القطبية

$k_2 = 1$ نمط التشغيل خطوة كاملة

$k_2 = 2$ نمط التشغيل نصف خطوة

m عدد أقطاب الثابت

p عدد أزواج أقطاب الدوار

زاوية الخطوة:

$$\beta = \frac{2\pi}{N_P}\,[\text{rad}] \quad , \quad \beta = \frac{360}{N_P}\,[^{o}]$$

سرعة الدوران **n**: تتعلق بتواتر نبضات التحكم.

ليكن **T** دور إشارة نبضات التشغيل ، و **f** تواتر هذه الإشارة.

$$n = \frac{1}{T \cdot N_P} = \frac{f}{N_P}$$

عزم المحرك:

$$T[N.m] = \frac{P[W]}{2\pi \cdot n[r.p.s]}$$

مسألة:

محرك خطوة بمغناطيس دائم، له المواصفات التالية:

4 أقطاب في الثابت، 6 أقطاب بارزة في الدوار، تبديل أحادي القطبية متناظر، وبخطوة كاملة، الاستطاعة المفيدة [W] 40، تواتر إشارة نبضات التشغيل [Hz]30. المطلوب حساب:

1. عدد الخطوات في الدورة (الدقة). $N_P = k_1 \cdot k_2 \cdot m \cdot p = 1 \times 1 \times 4 \times 3 = 12 steps$
2. الخطوة الزاوية. $\beta = \frac{360^o}{N_P} = \frac{360^o}{12} = 30^o$
3. سرعة الدوران. $n = \frac{f}{N_P} = \frac{30}{12} = 2.5[rpm]$
4. عزم المحرك. $T = \frac{P}{2\pi \cdot n} = \frac{40}{2\pi \times 2.5 \times 60} = 0.042[N.m]$

3. محرك الخطوة الهجين:

Hybrid stepper motor

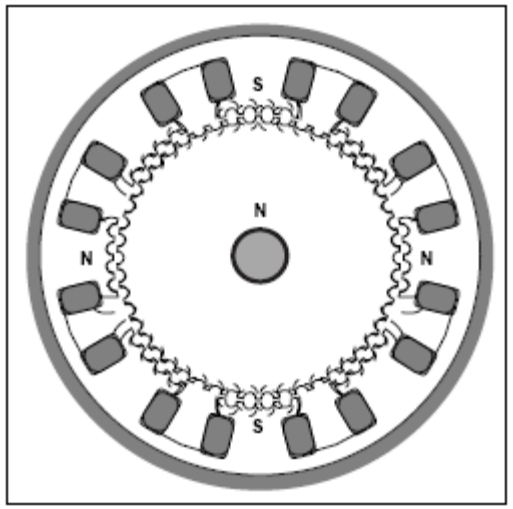
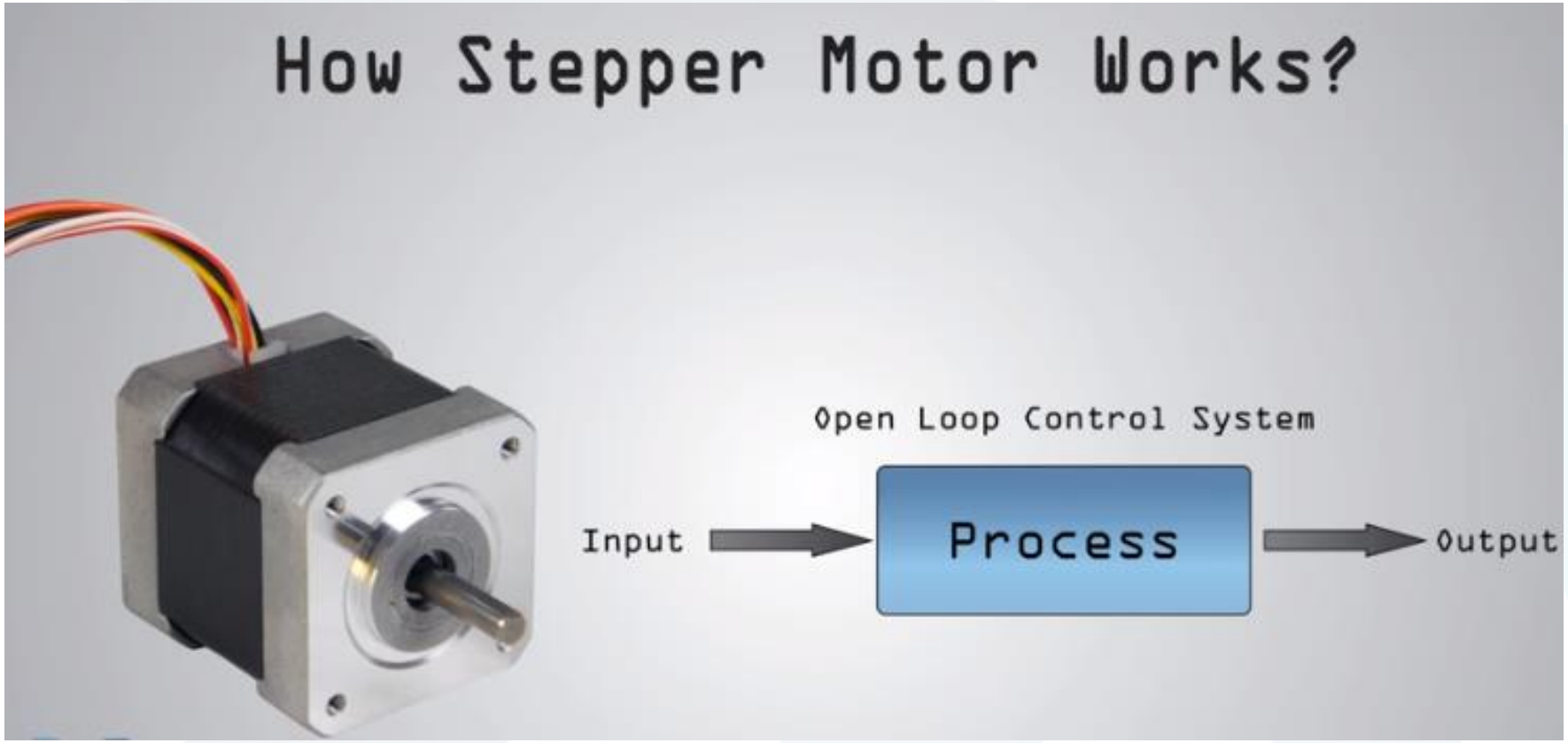


Figure 3. Cross-section of a hybrid stepper motor.

وهي محركات ثمنها أغلى من محركات المغانط الدائمة ولكنها تتميز بأن زاويتها الخطوية صغيرة جداً تتراوح (0.9 -3.6) درجة حيث يلزمنا تطبيق مابين 100 إلى 400 نبضة عمل من أجل إتمام دورة كاملة وهذا يعطينا دقة عالية في العمل.

ويكون فيها الدوار يشبه دوار المغانط الدائمة إلا أنها مسننة الشكل (3) لذلك فهي هجينة بين محركات الدائمة والممانعة المتغيرة.

و يكون فيها محور الدوران عبارة عن مغناطيس دائم وتقوم الأسنان بتوجيه الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية بين الثابت والدوار.


How Stepper Motor Works?
Open Loop Control System
Input
Process
Output

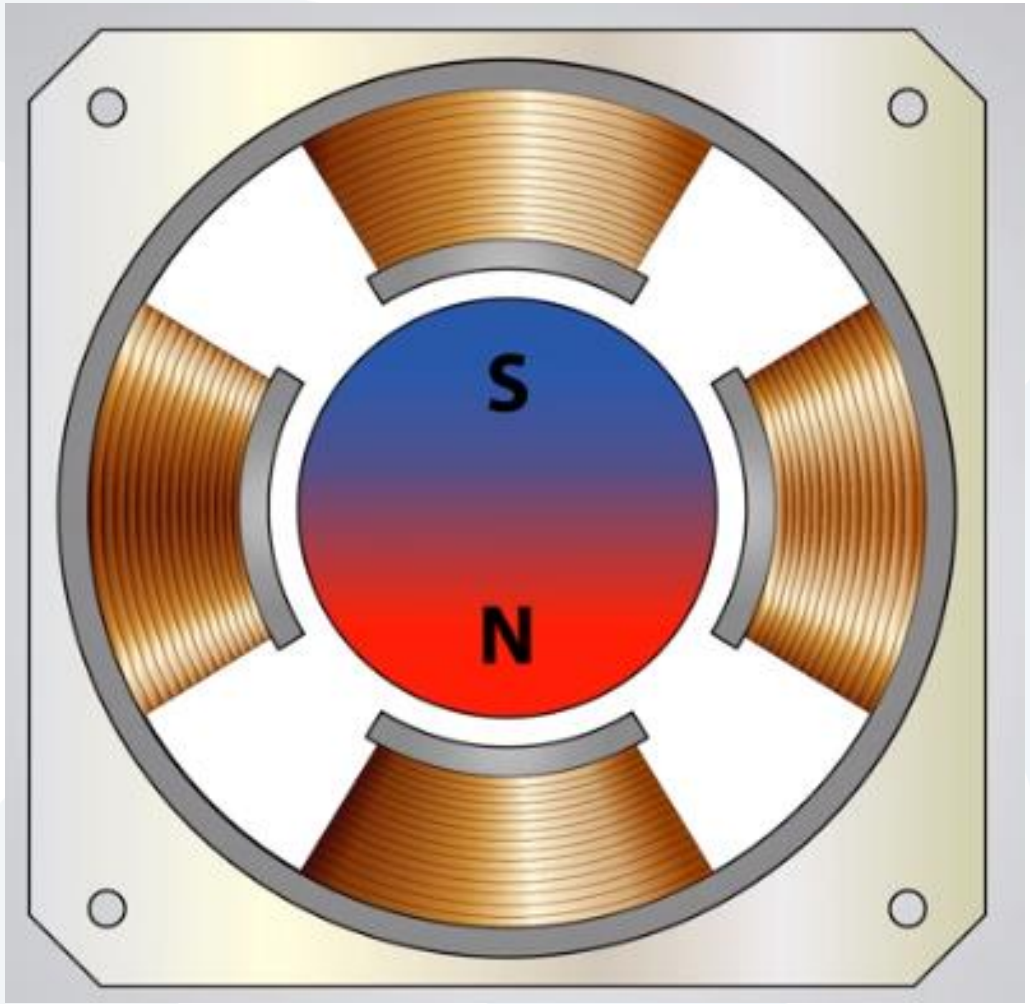
أنماط تشغيل محركات الخطوة

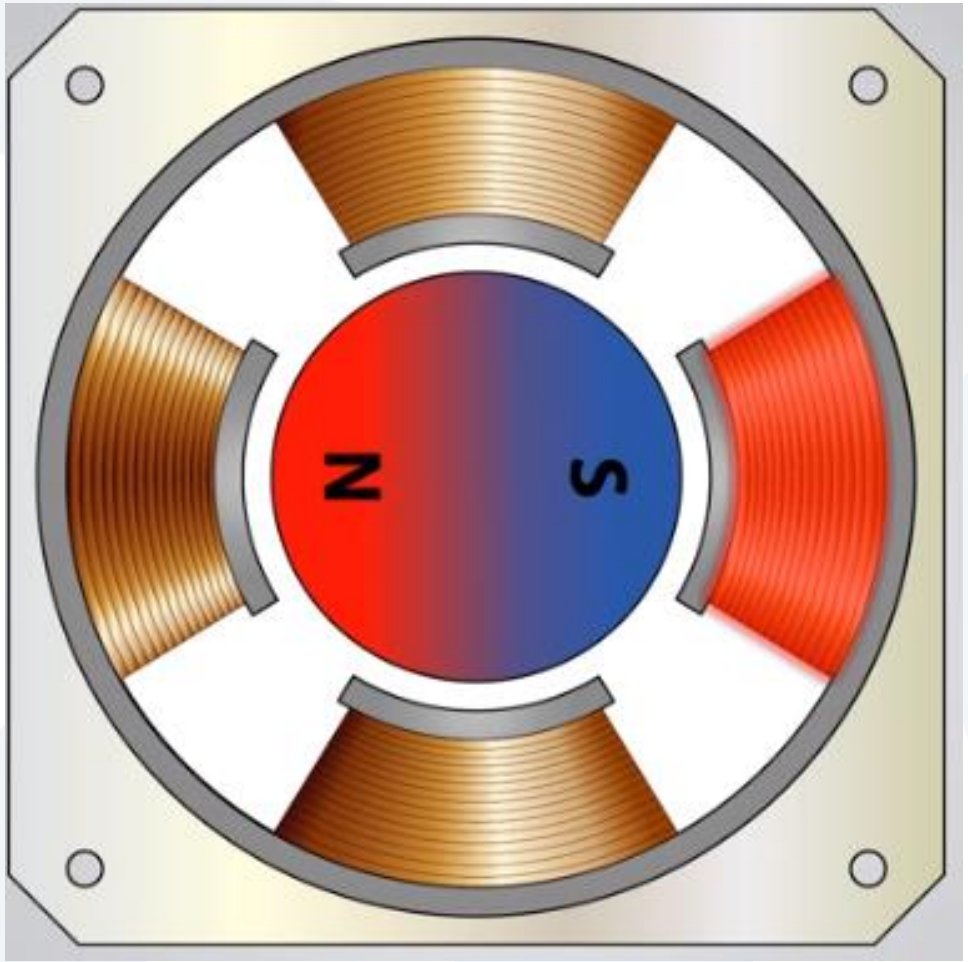
Stepping Modes

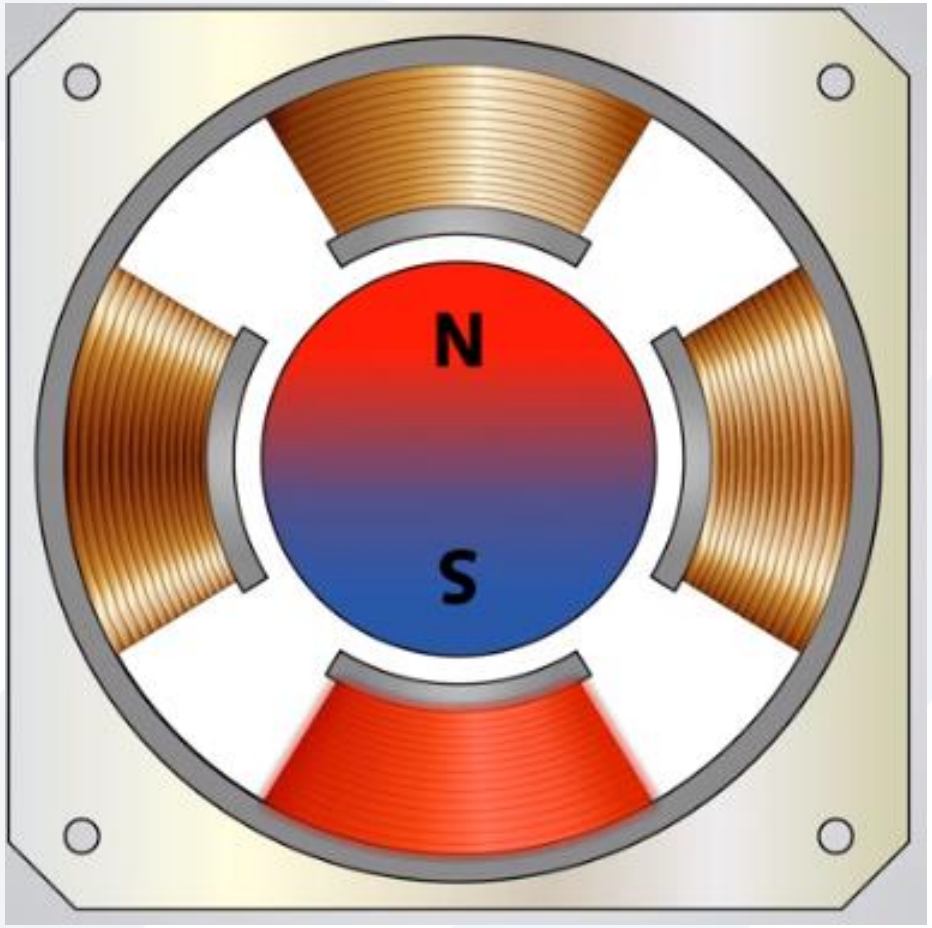
هناك ثلاث أنماط Stepping Modes لتشغيل محركات الخطوة، تعتمد كلها على تسلسل تفعيل الملفات الثابتة في المحرك.

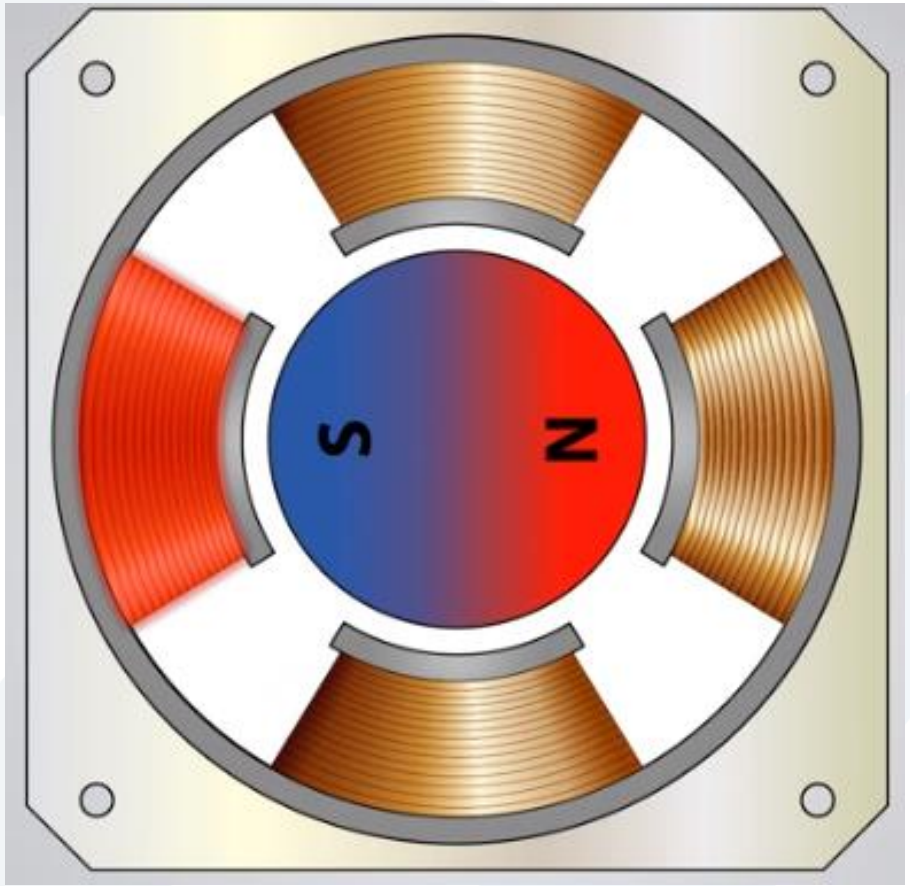
أولاً : Wave Drive

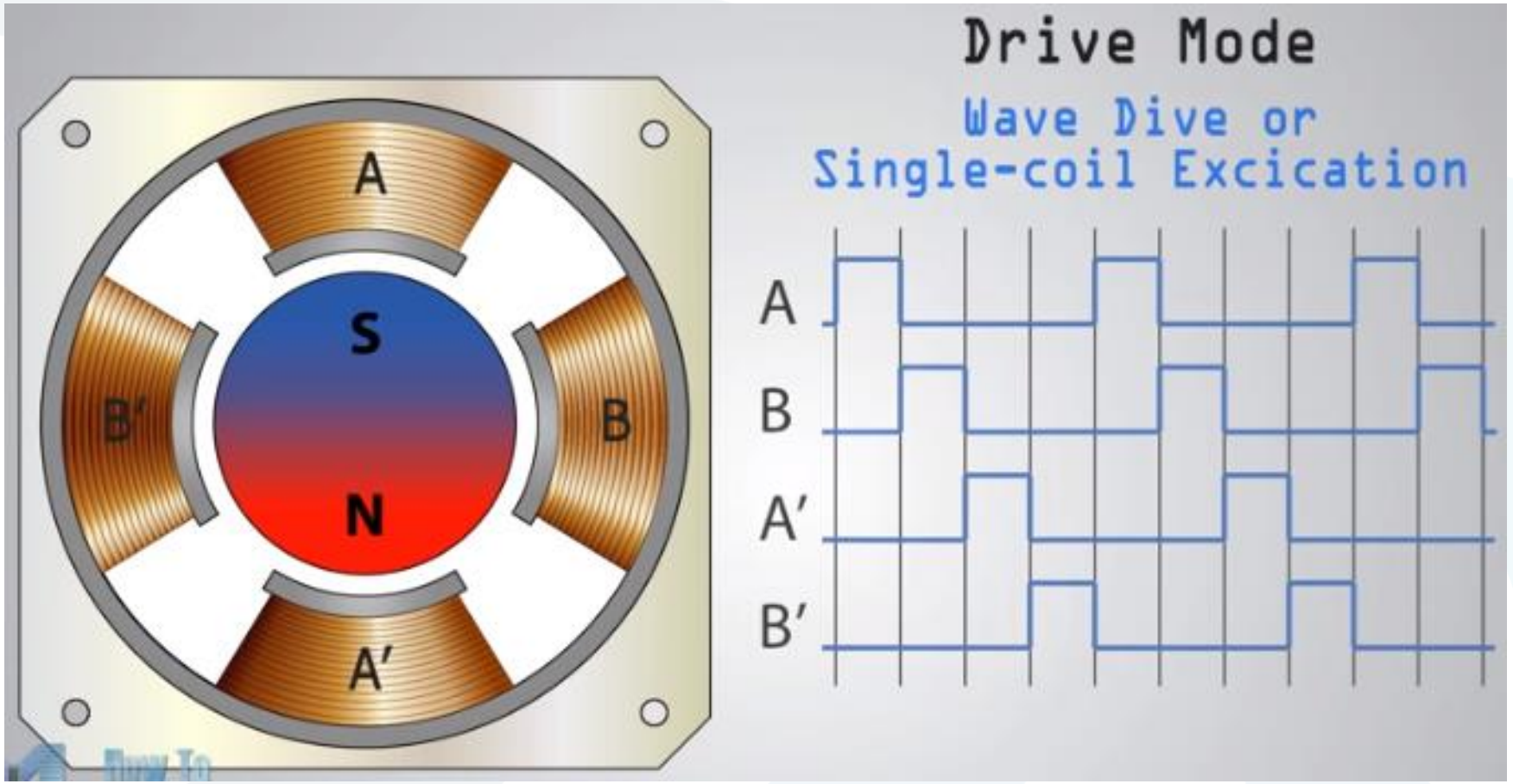
في هذا النوع يتم تفعيل طور واحد فقط في كل مره.

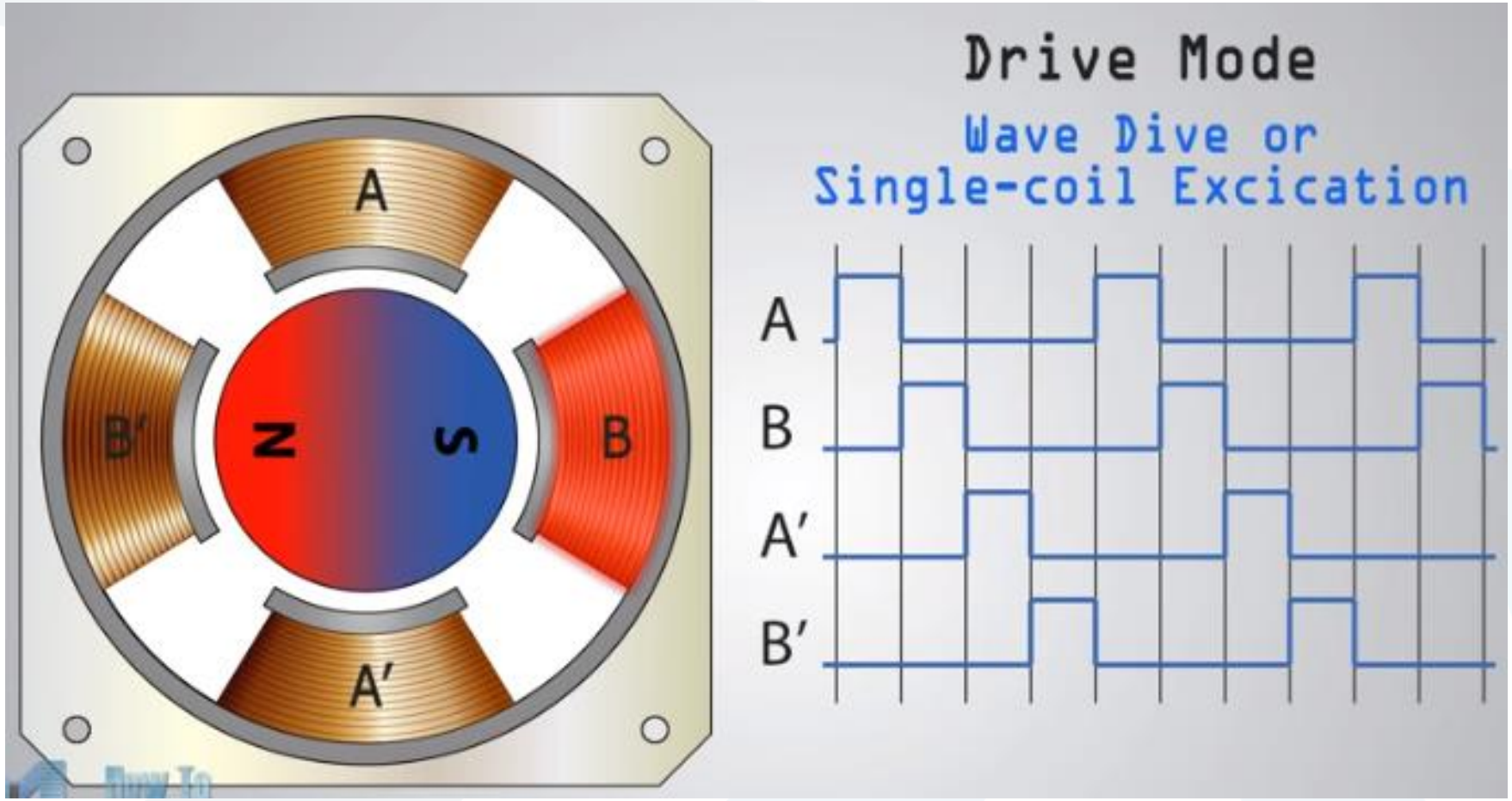

S
N

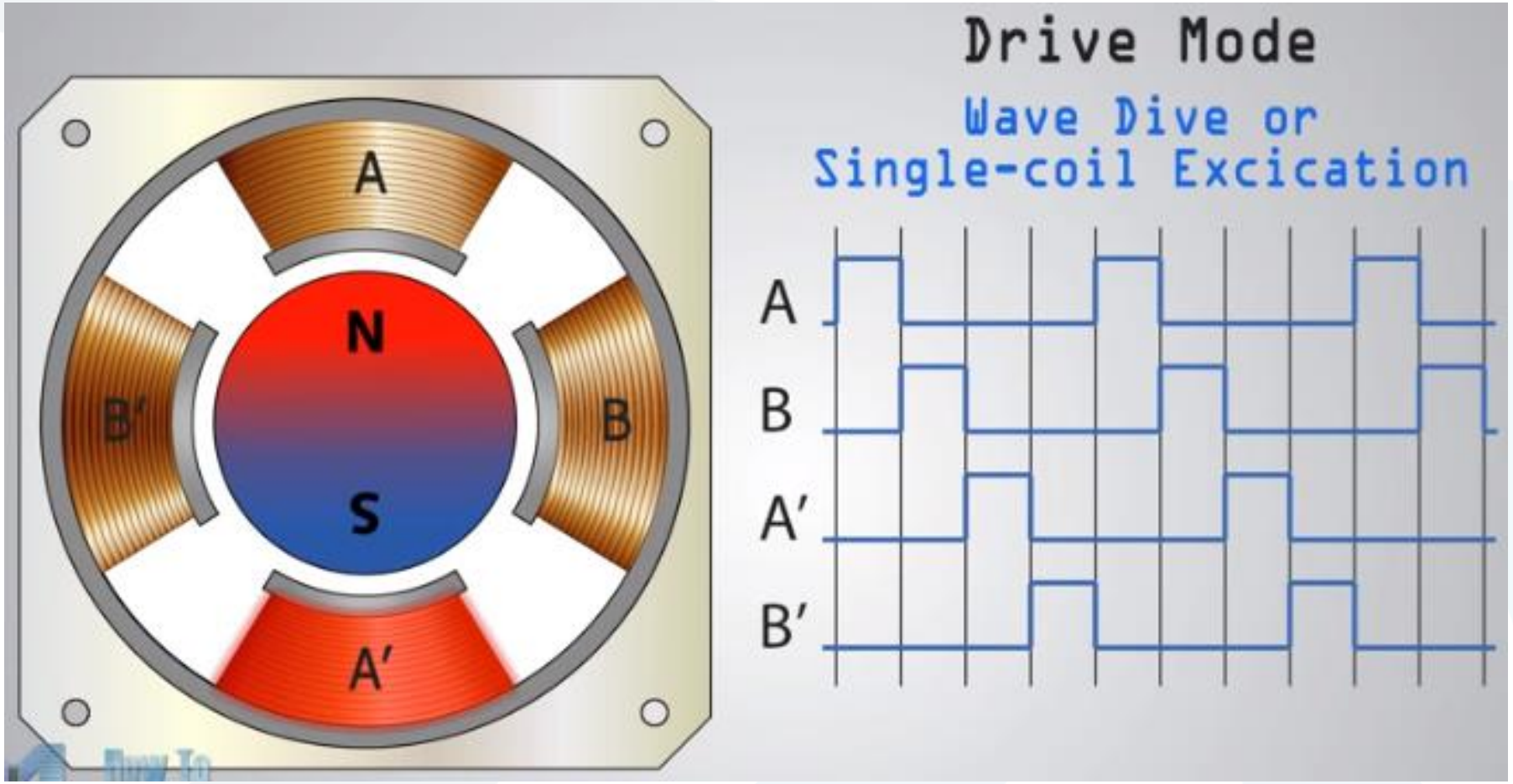

N
S

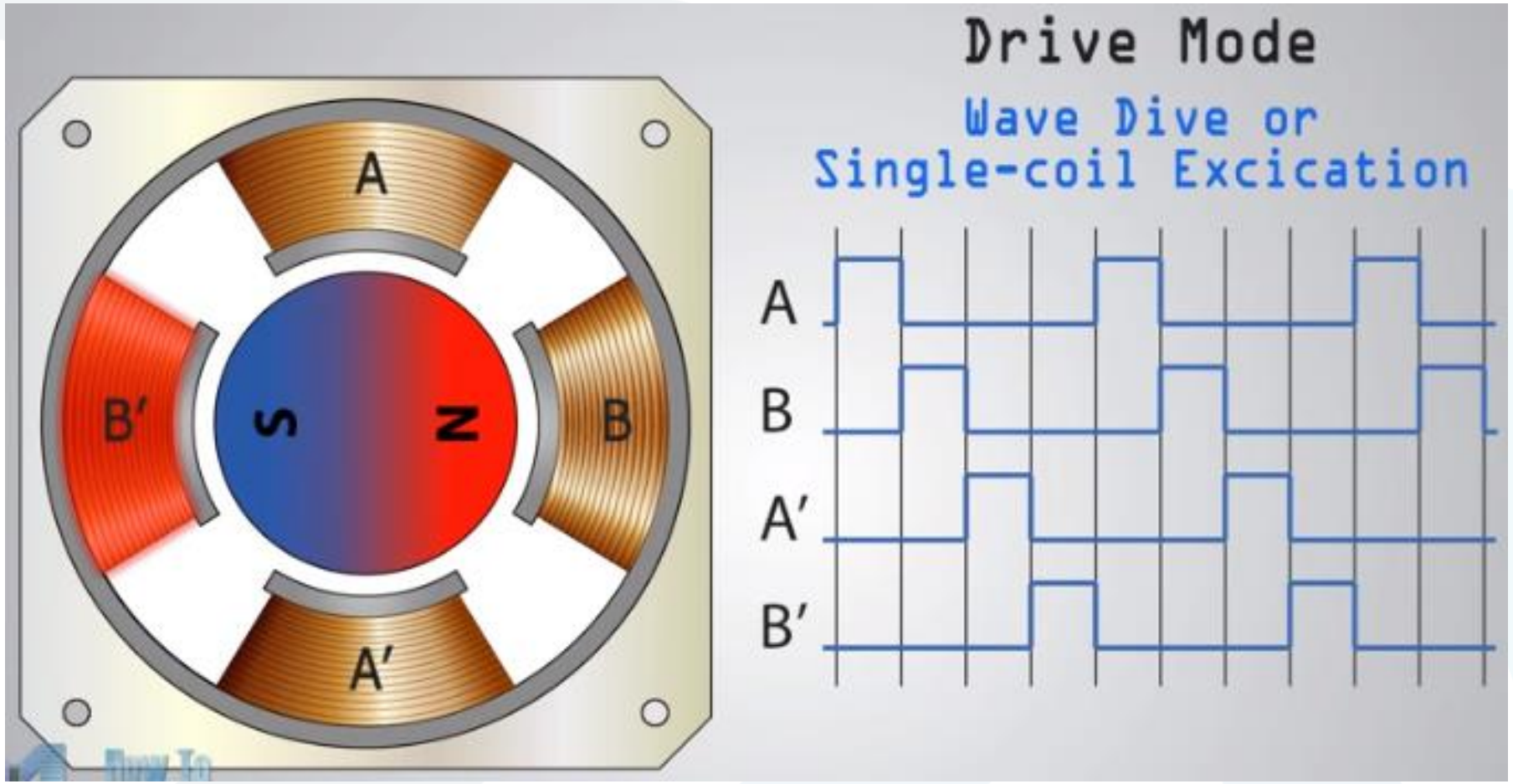

N
S


S
N


Drive Mode
Wave Dive or
Single-coil Excication
A
B
A′
B′
S
N
A
B
A′
B′

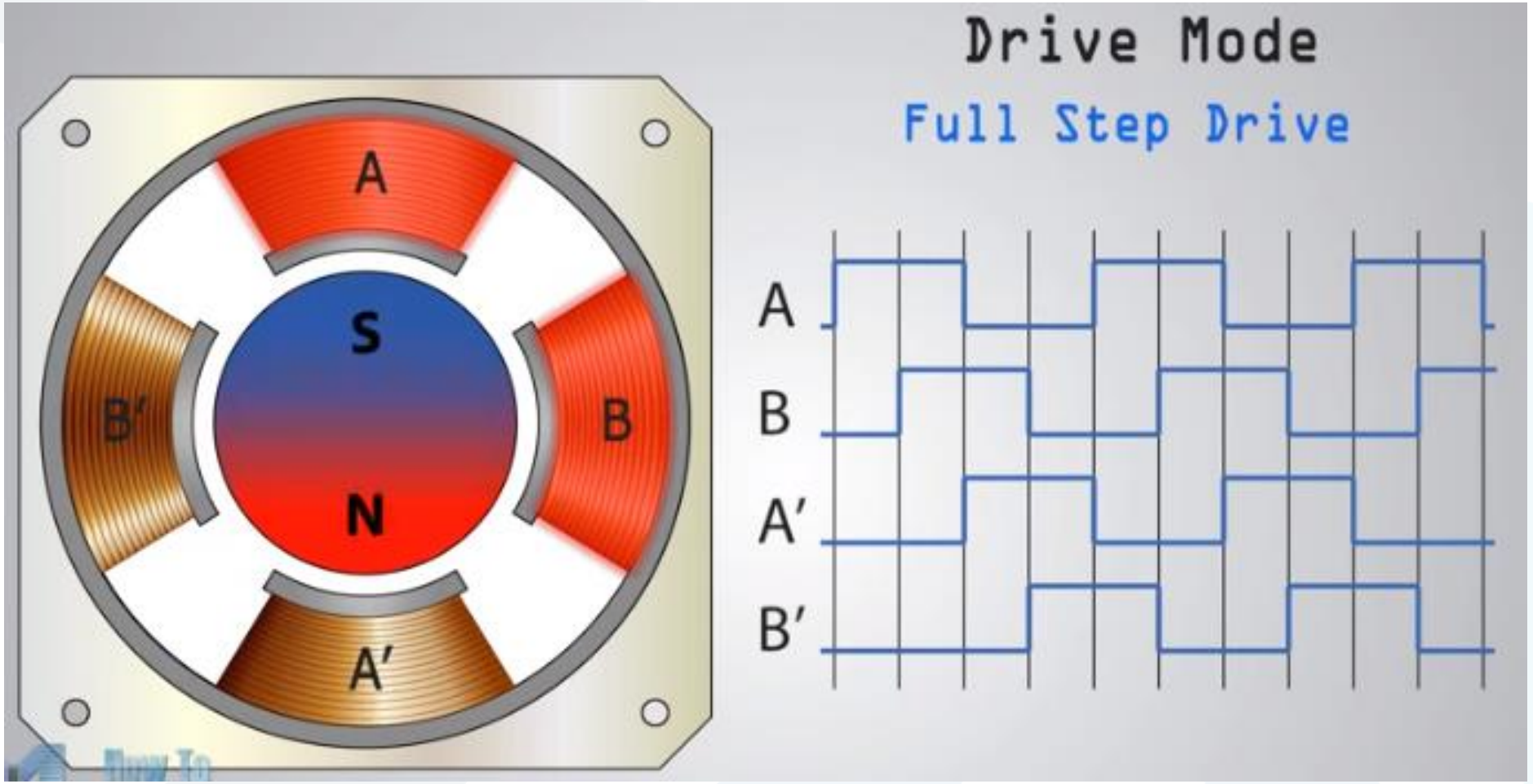

Drive Mode
Wave Dive or
Single-coil Excication
A
B
A′
B′
A
B′
N
S
B
A′

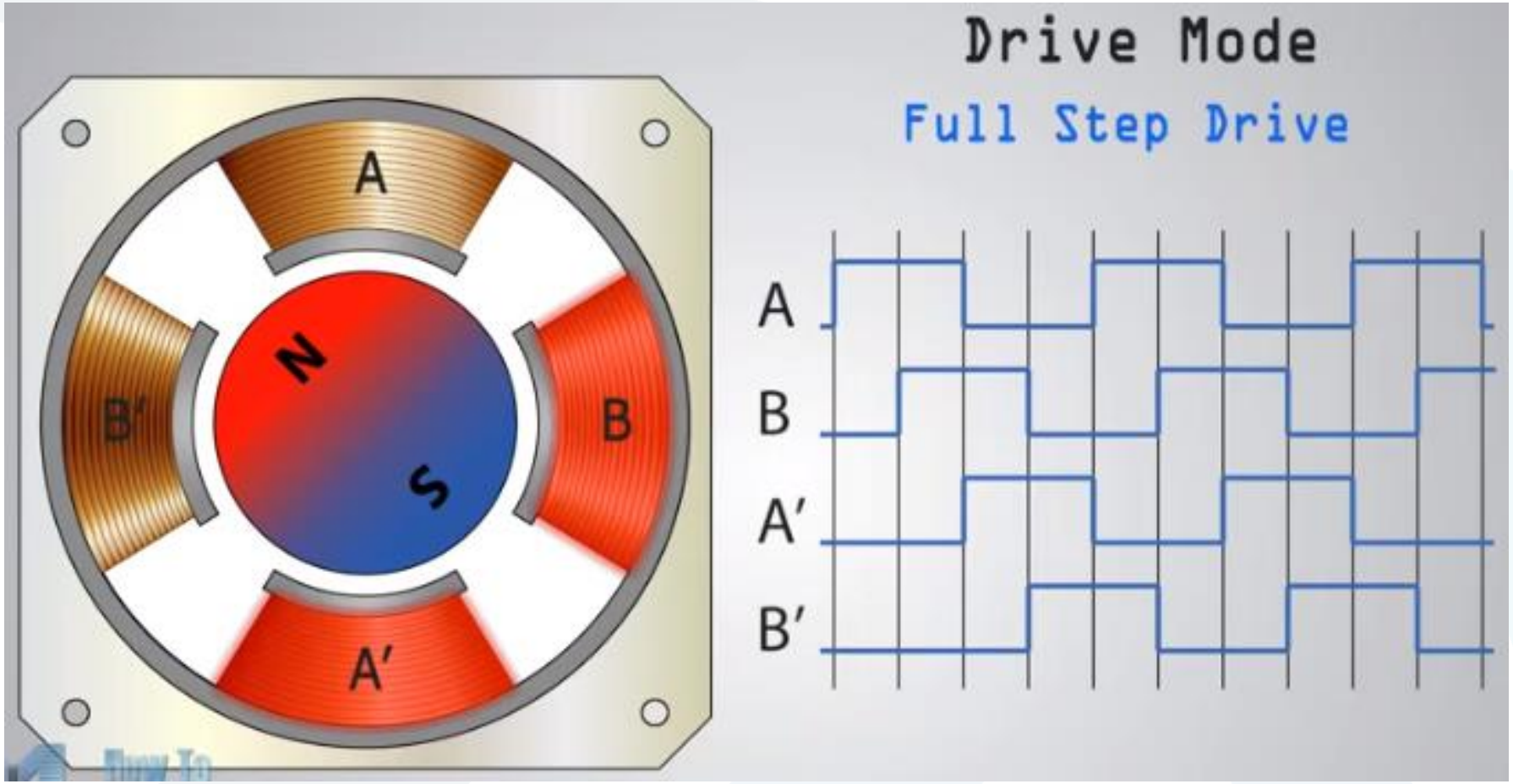

Drive Mode
Wave Dive or
Single-coil Excication
A
B
N
S
B'
A'
A
B
A'
B'

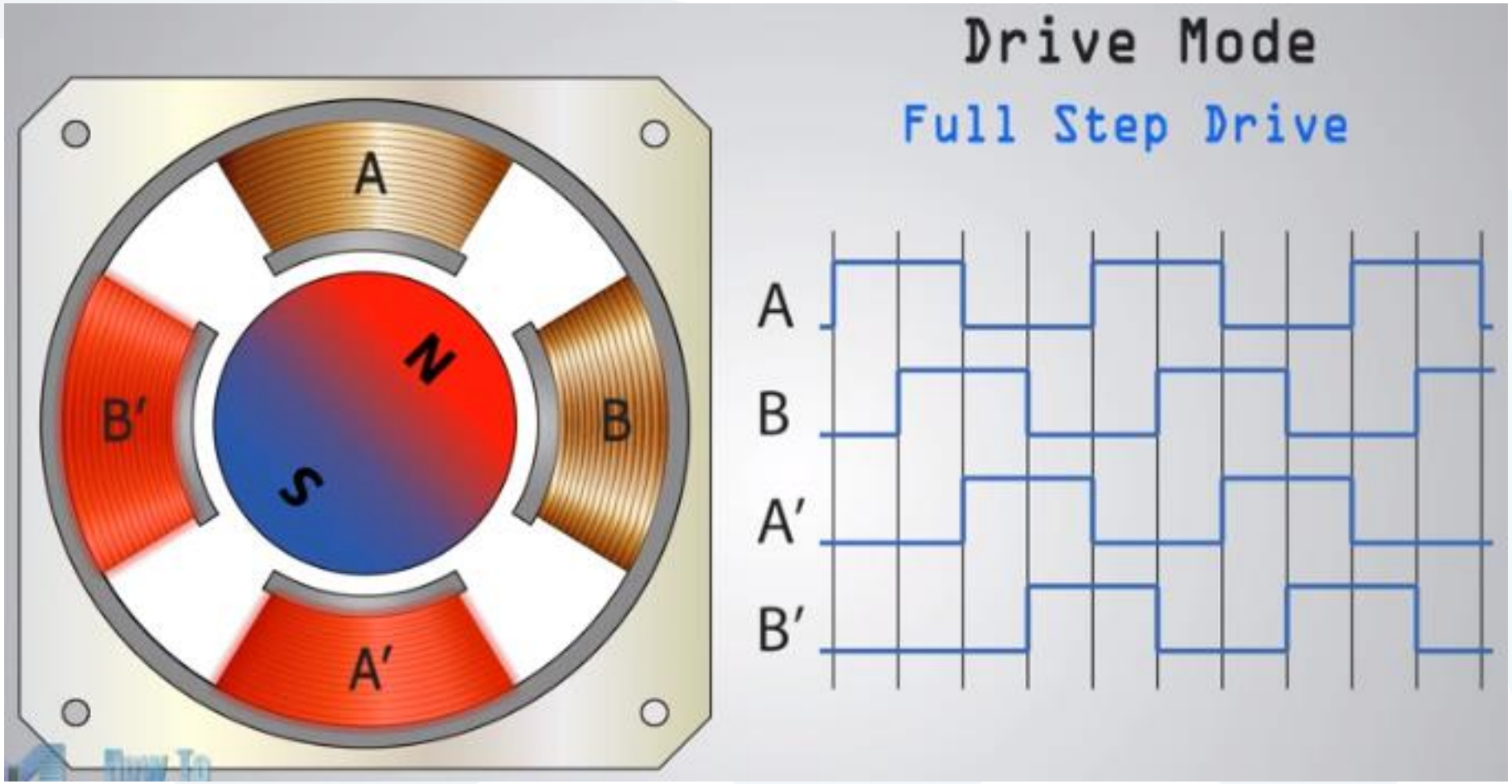

Drive Mode
Wave Dive or
Single-coil Excication
A
B
A′
B′
S
N
A
B
A′
B′

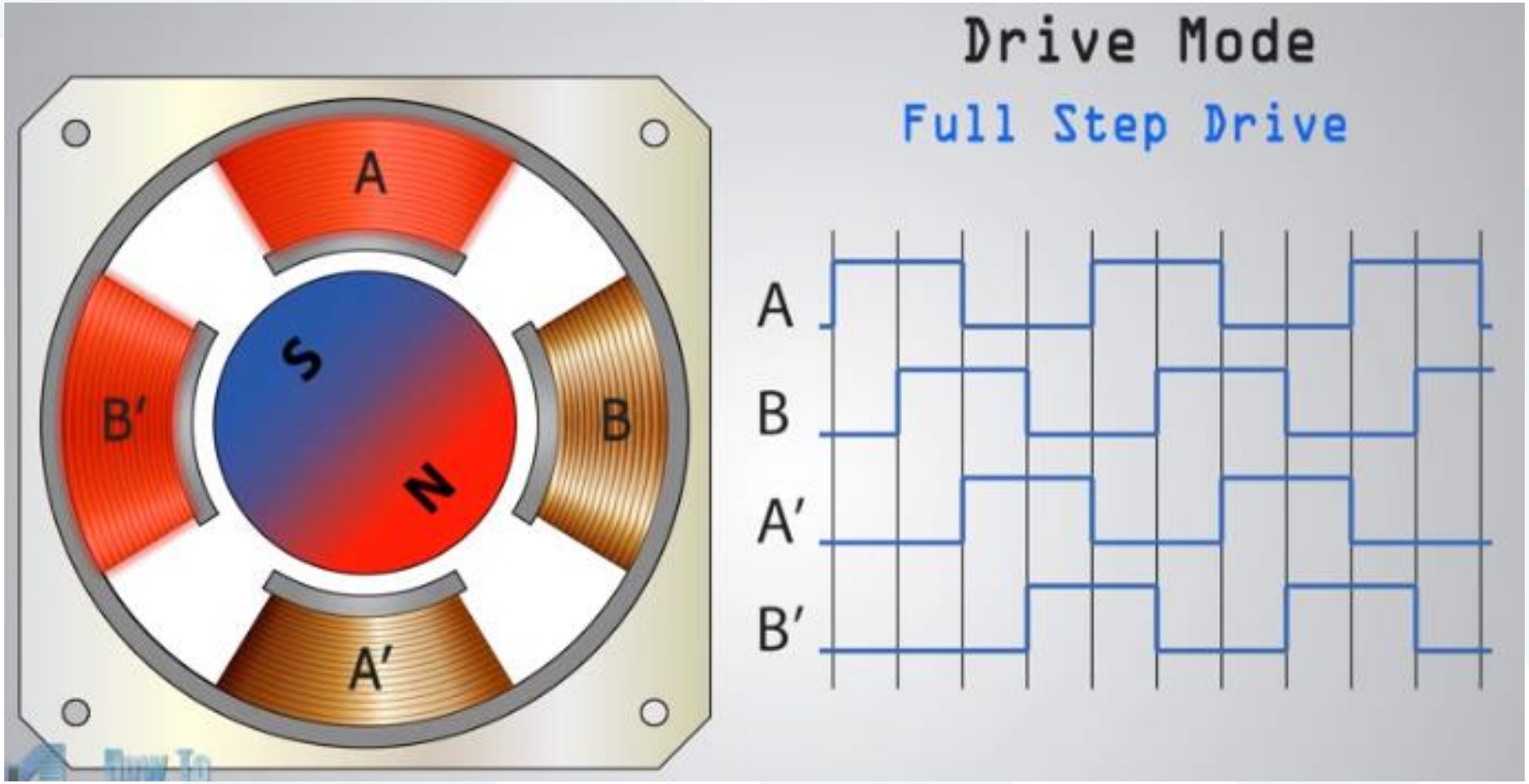
ثانياً : Full Drive

في هذا النوع يتم تفعيل طورين في كل مره.


Drive Mode
Full Step Drive
A
B
A′
B′
S
N
A
B
A′
B′

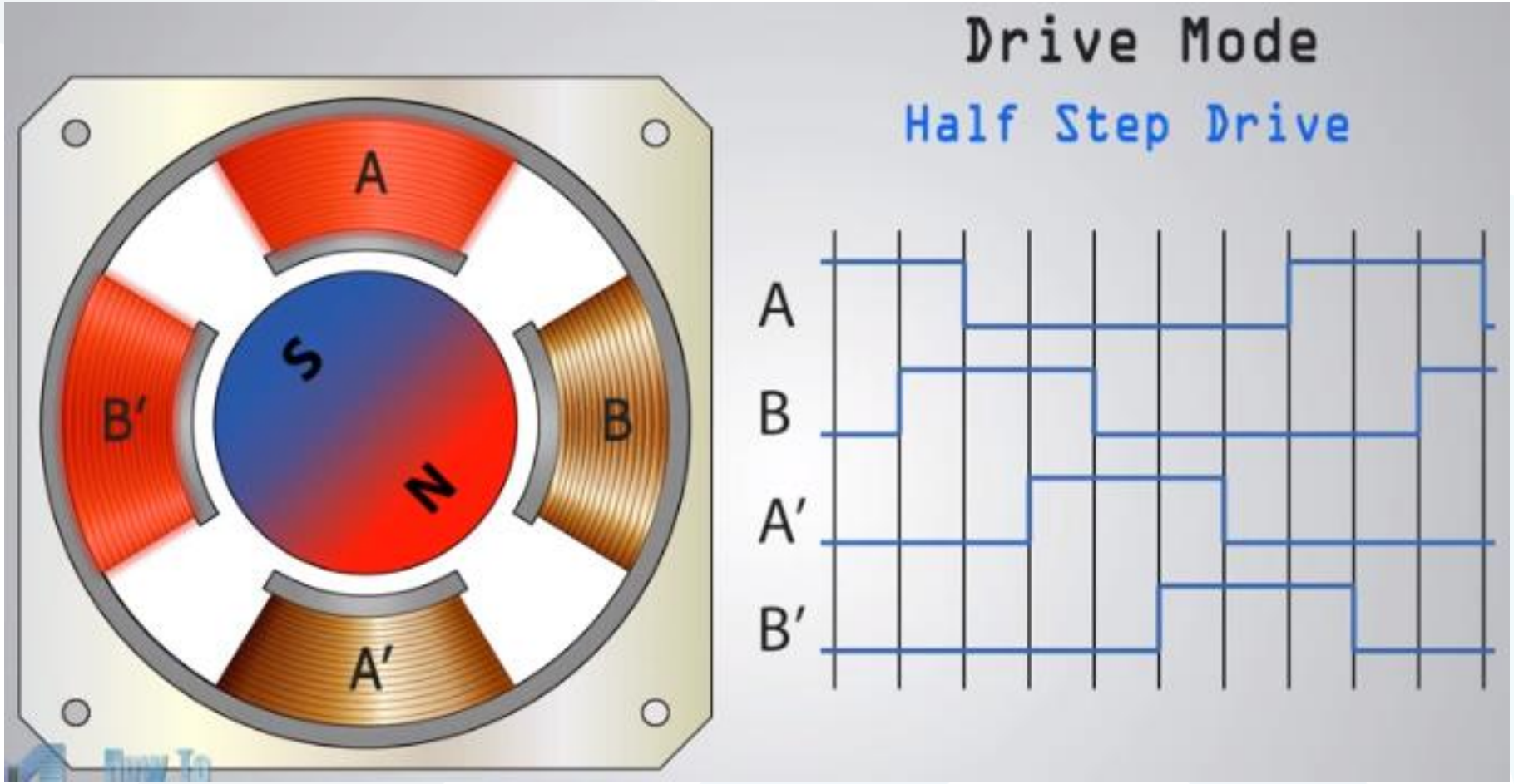

Drive Mode
Full Step Drive
A
B
A′
B′
N
S
A
B
A′
B′

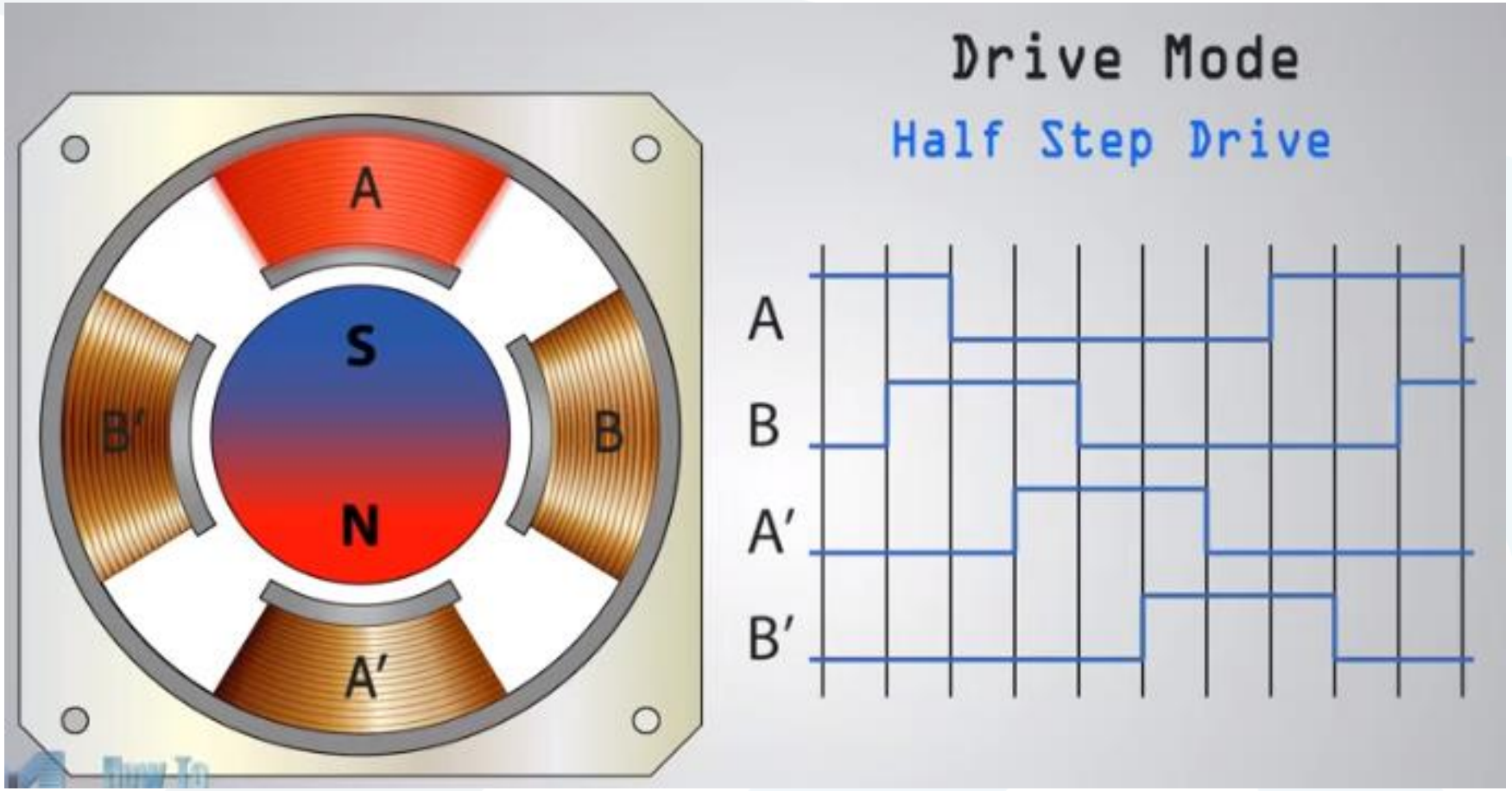

Drive Mode
Full Step Drive
A
B
A′
B′
N
S
A
B
A′
B′

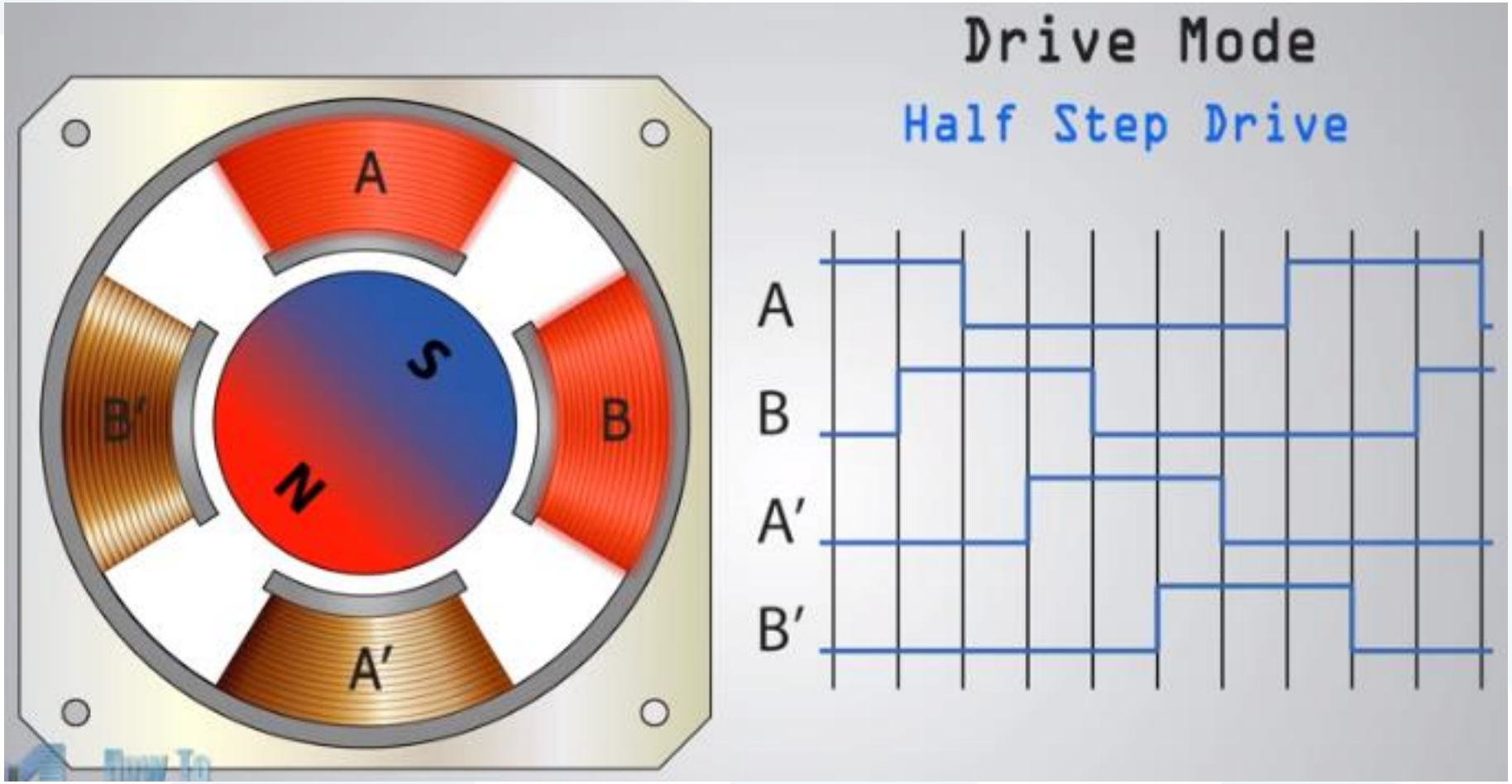

Drive Mode
Full Step Drive
A
B
A′
B′
S
N
A
B
A′
B′

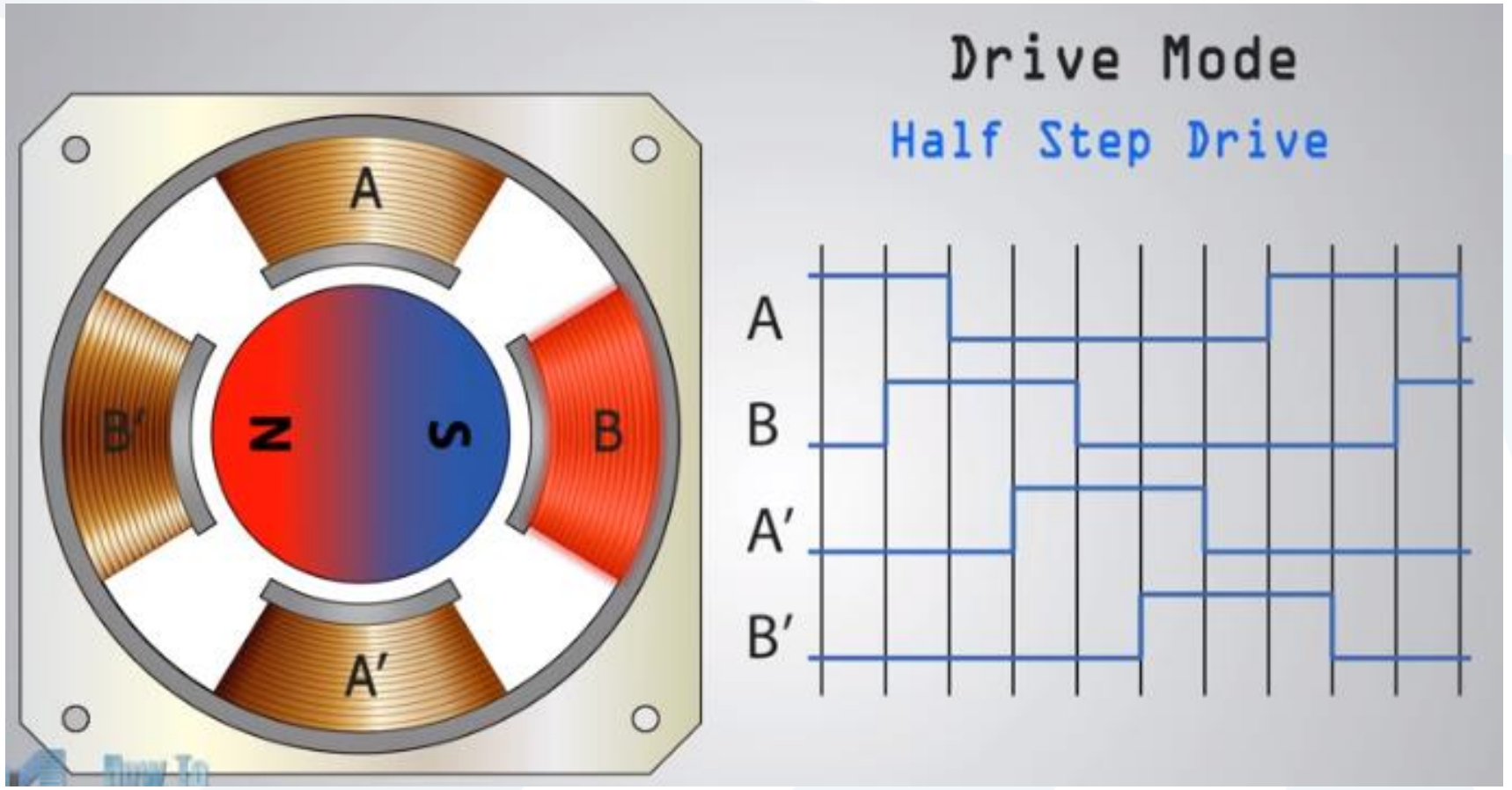
ثالثاً : Half Drive

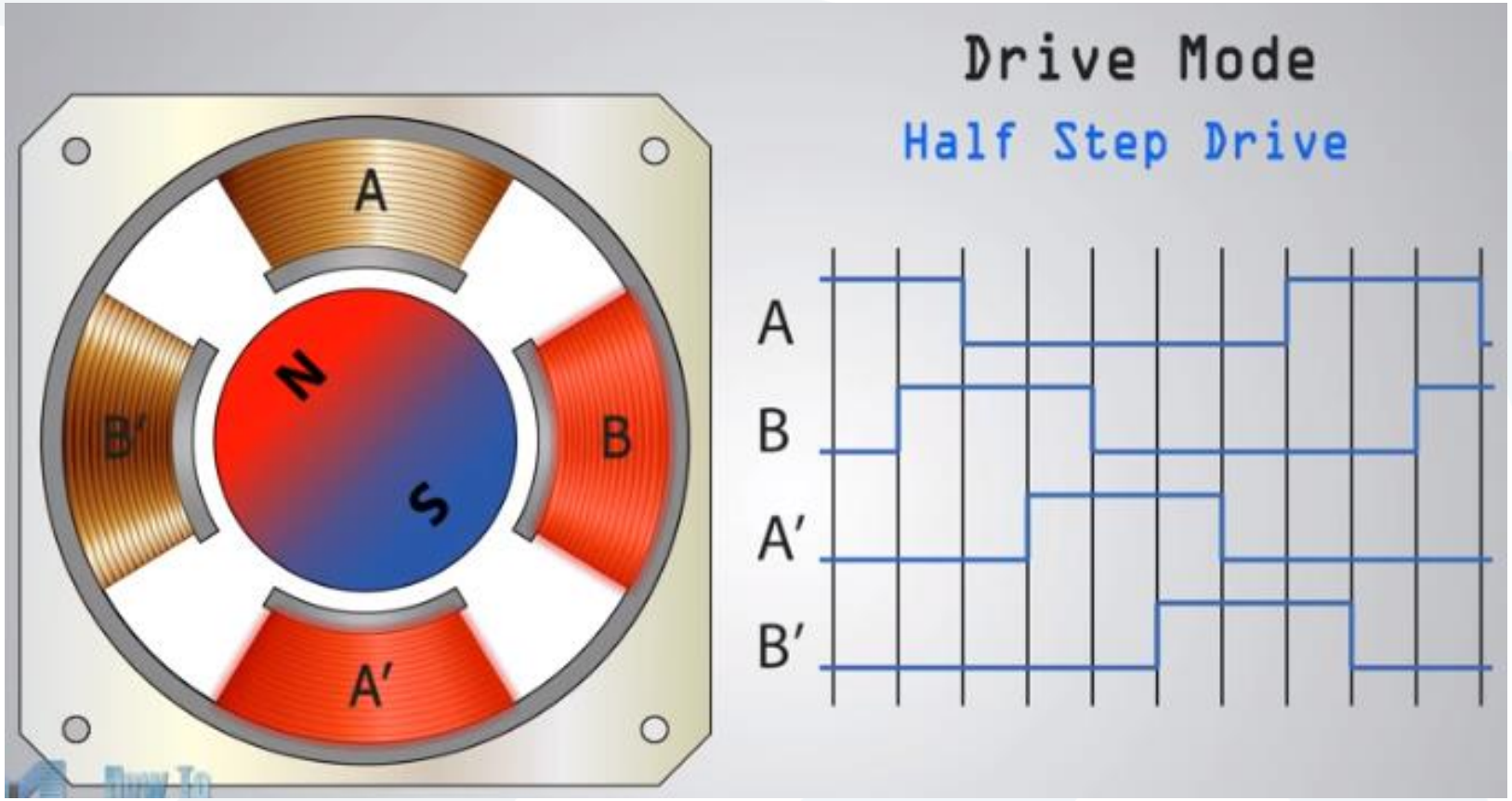
في هذا النوع يتم تفعيل طور واحد ثم طورين، بشكل تبادلي، وهذا الامر يزيد من دقة المحرك.

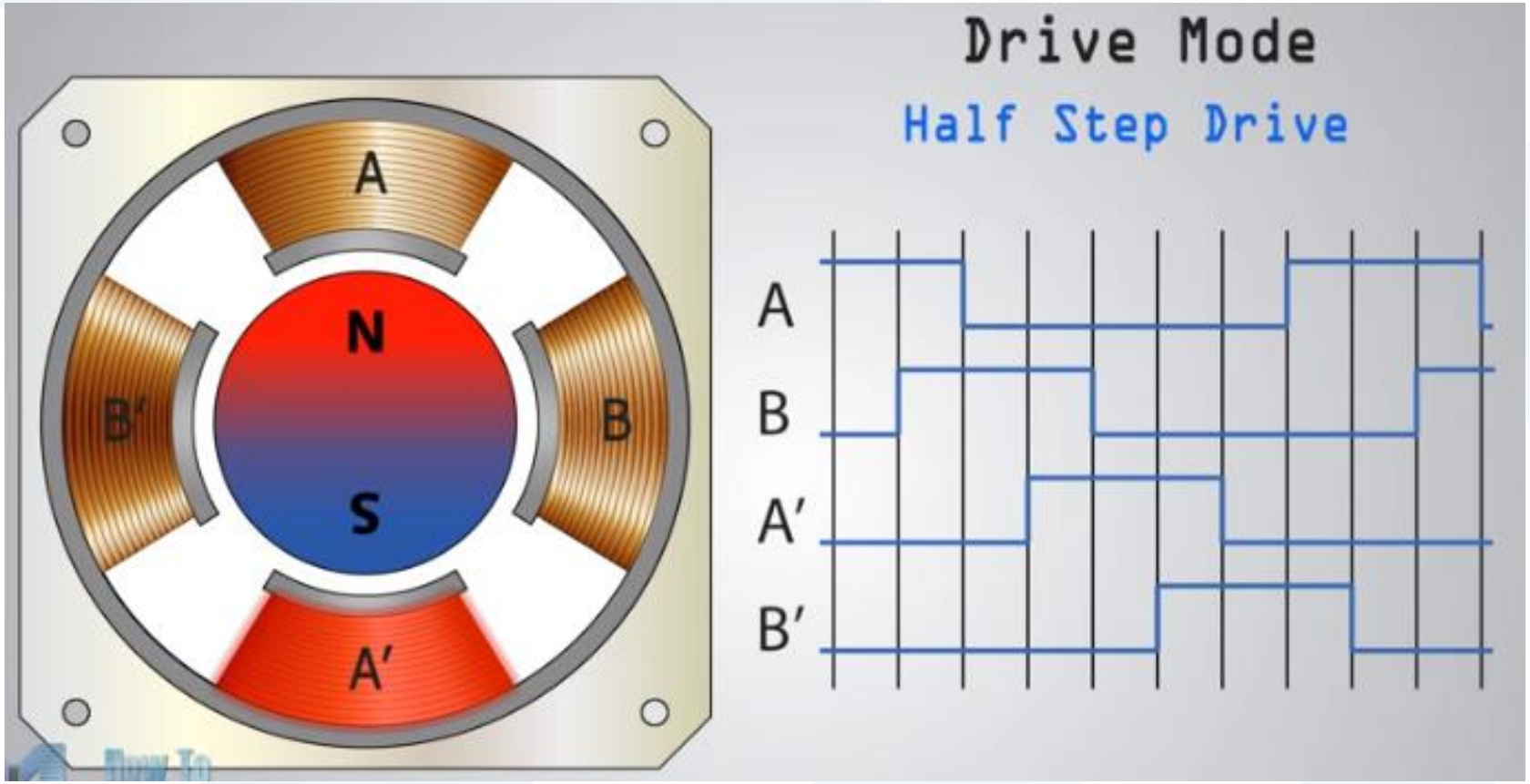

Drive Mode
Half Step Drive
A
B
A′
B′
S
N
A
B
A′
B′

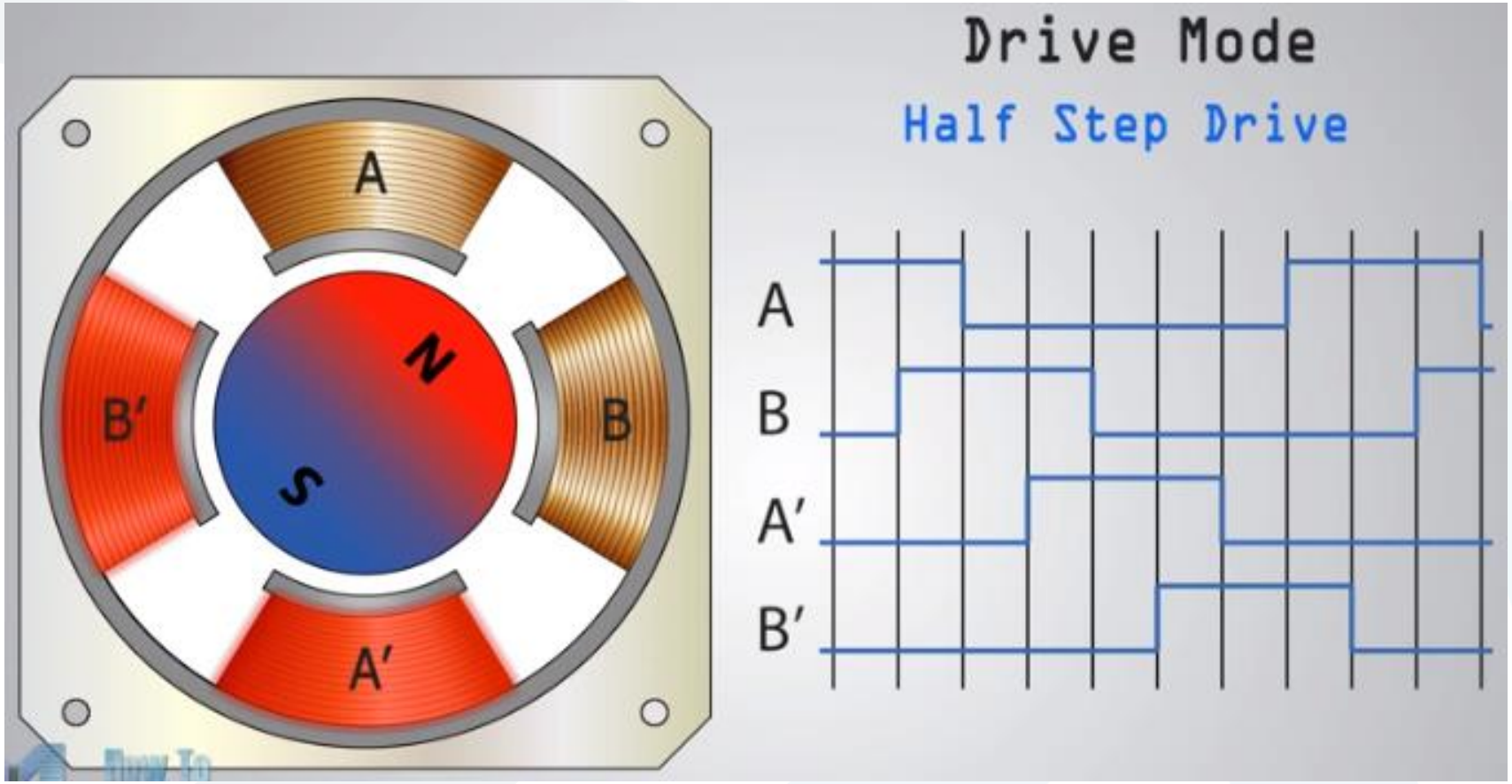

Drive Mode
Half Step Drive
A
B
A′
B′
S
N
A
B
A′
B′

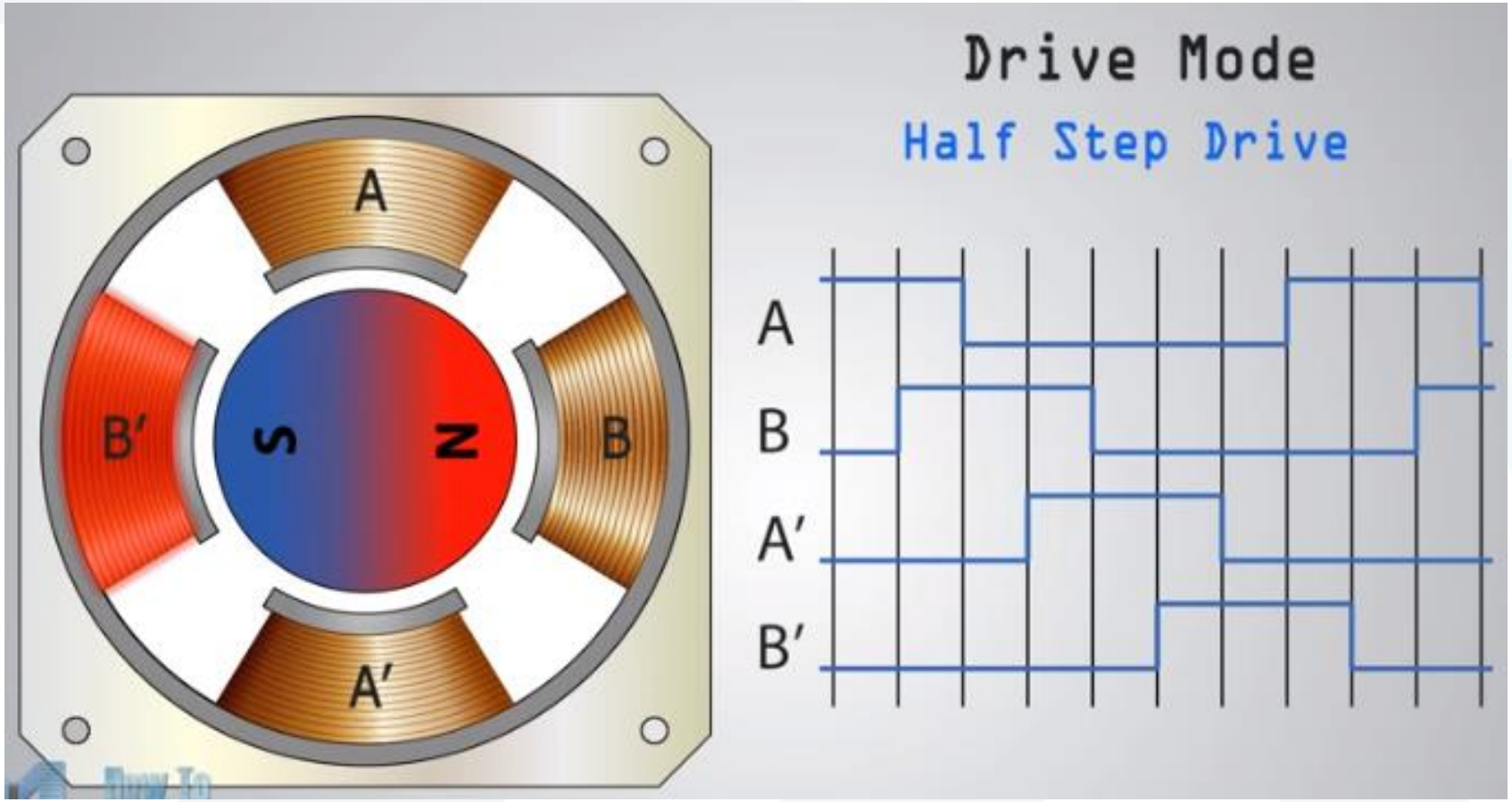

Drive Mode
Half Step Drive
A
B
S
N
B′
A′
A
B
A′
B′

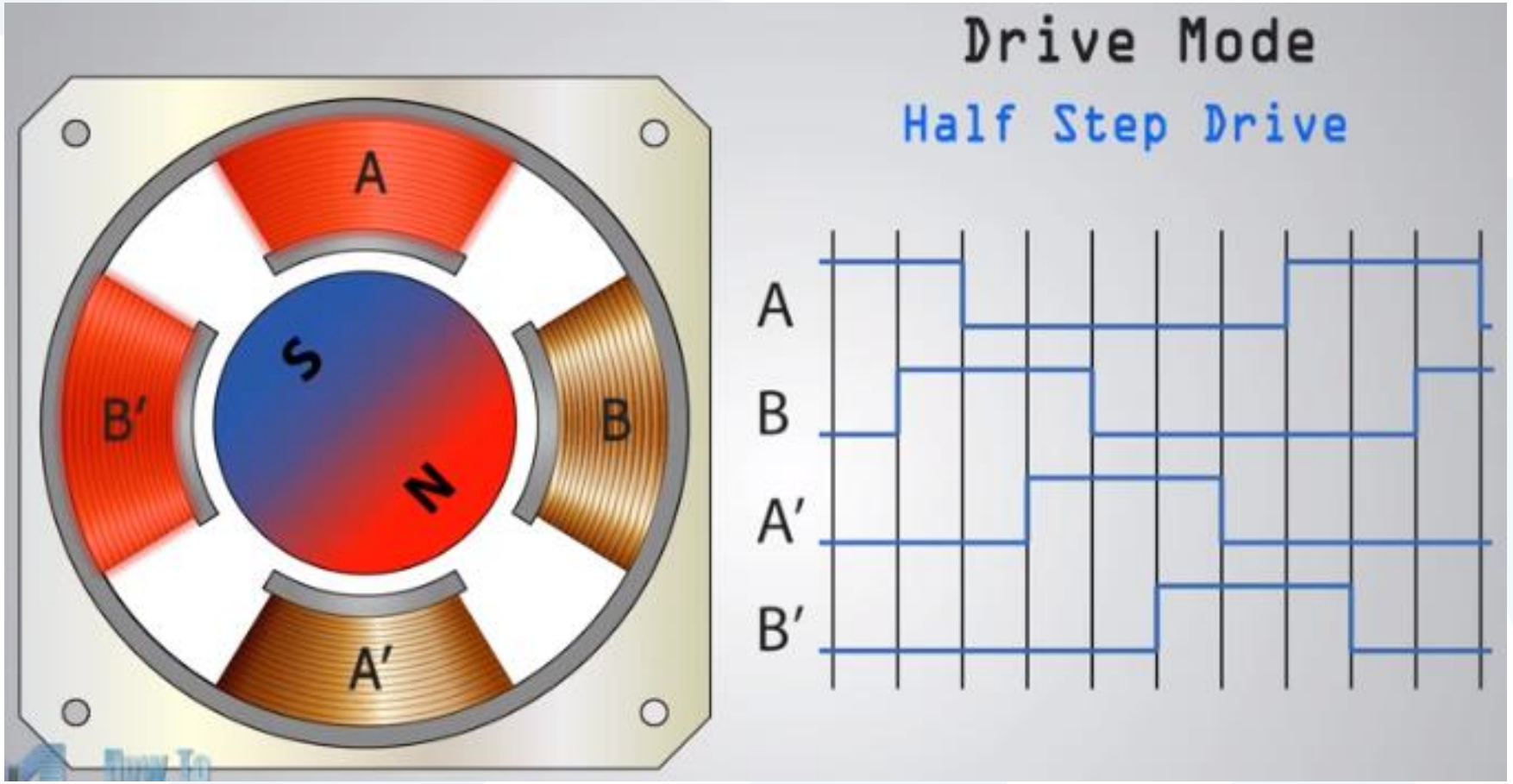

Drive Mode
Half Step Drive
A
B
A′
B′
N
S
A
B
A′
B′

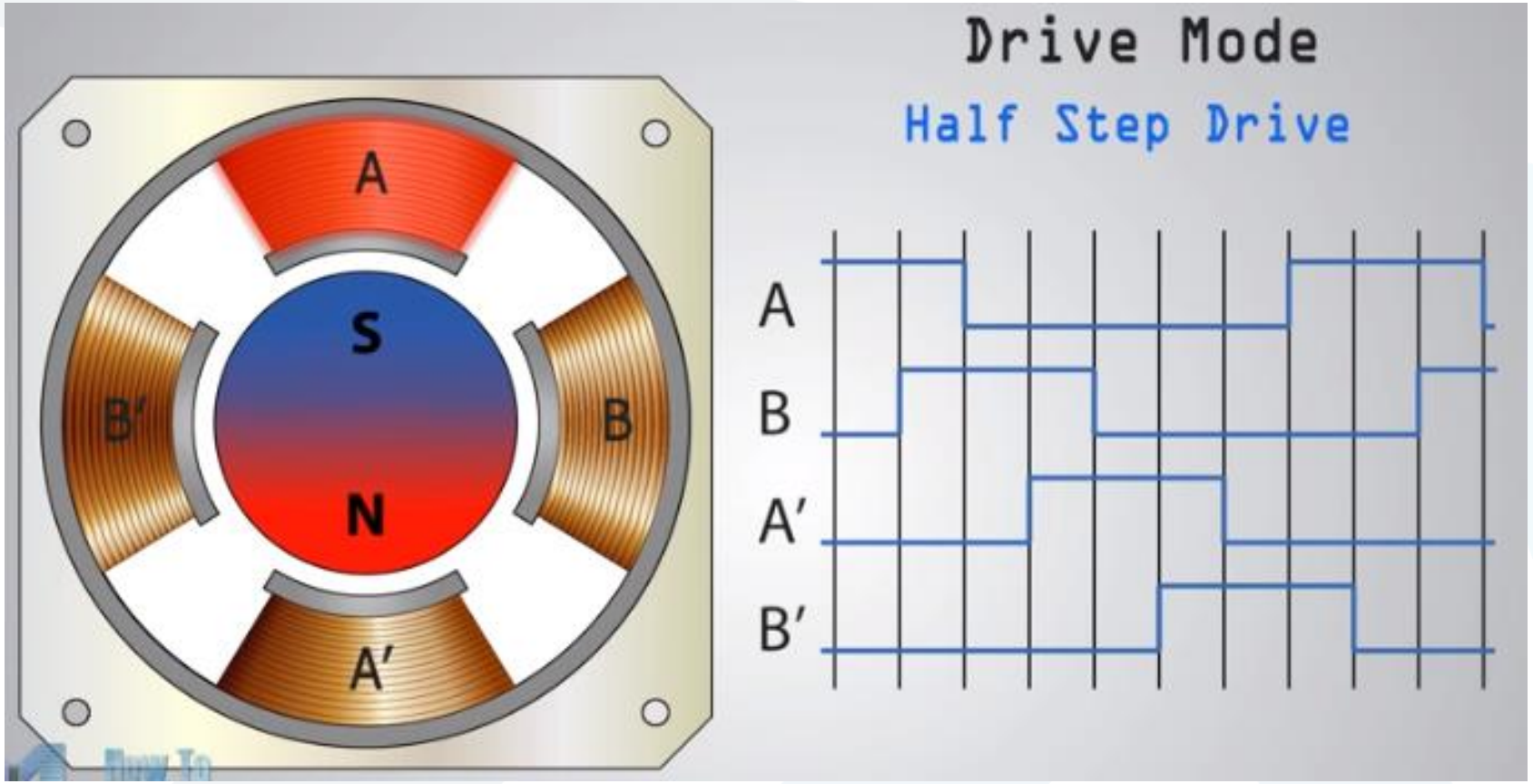

Drive Mode
Half Step Drive
A
B
A′
B′
N
S
A
B
A′
B′


Drive Mode
Half Step Drive
A
B
N
S
B′
A′
A
B
A′
B′


Drive Mode
Half Step Drive
A
B
B′
A′
N
S
A
B
A′
B′


Drive Mode
Half Step Drive
A
B′
S
N
B
A′
A
B
A′
B′


Drive Mode
Half Step Drive
A
B′
B
S
N
A′
A
B
A′
B′

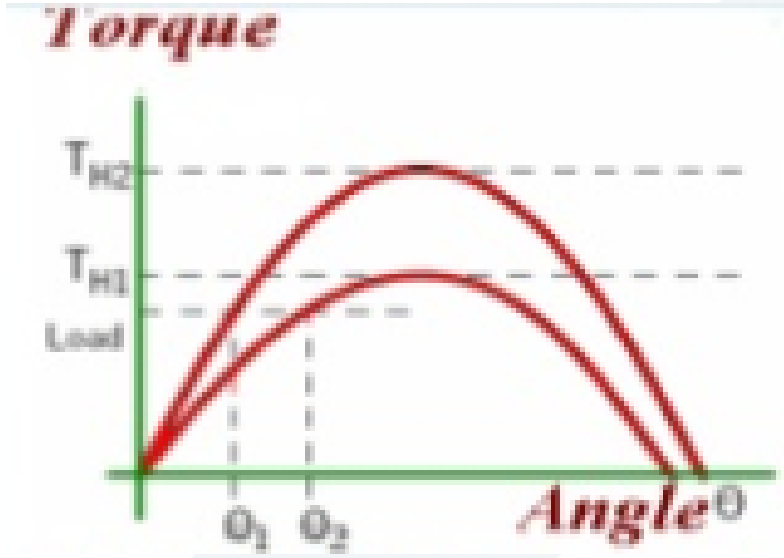

Drive Mode
Half Step Drive
A
B
S
N
B′
A′
A
B
A′
B′

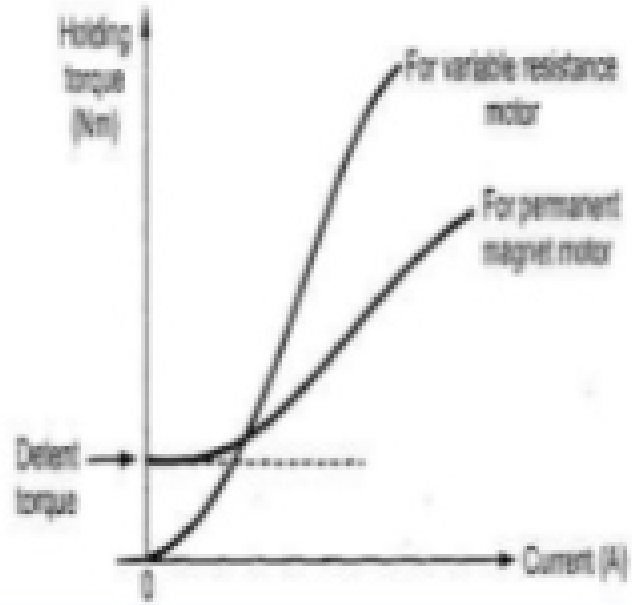
مميزات محرك الخطوة:

مميزات استاتيكية ، ومميزات ديناميكية

المميزات الستاتيكية: هي علاقة العزم بزاوية الموضع (زاوية الخطوة)، أو علاقة العزم بالتيار:

$T=f(\beta)$ **أو** $T=f(I)$





المميزات الديناميكية: هي علاقة العزم بسرعة الدوران: $T=f(n)$