

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ, МЕХАТРОНІКИ І  
РОБОТОТЕХНІКИ**

# **Приводи верстатного та робототехнічного обладнання**

Методичні рекомендації  
до виконання самостійної роботи  
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)  
Освітні програми – «Комп'ютерний інжиніринг технологій, робототехніка і 3D  
друк», «Галузеве машинобудування»  
Спеціальності – 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування»  
Галузь знань – 13 «Механічна інженерія»

Розглянуто на засіданні кафедри  
машинобудування, мехатроніки і  
робототехніки  
Протокол № 18 від «20» червня 2024 р.

Кропивницький  
ЦНТУ  
2024

Приводи верстатного та робототехнічного обладнання  
Методичні рекомендації до виконання самостійної роботи для здобувачів вищої освіти всіх форм навчання / [уклад. : А. Кириченко, А. Гречка, П. Єршомін] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. машинобудування, мехатроніки і робототехніки. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024 – 30 с.

Розглянуто на засіданні кафедри  
машинобудування, мехатроніки і  
робототехніки  
Протокол № 18 від «20» червня 2024 р.

Укладачі:

Андрій Кириченко, доктор техн. наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи, професор кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки;

Андрій Гречка, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки;

Павло Єршомін, канд. техн. наук, старший викладач кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки.

Рецензент: В. Мірзак, канд. техн. наук., доцент, доцент кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки

Методичні рекомендації до виконання самостійної роботи для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» розроблені у відповідності до освітньо-професійних програм підготовки бакалаврів для усіх форм навчання.

Здобувачі освіти денної і заочної форм навчання, у відповідності до даних методичних рекомендацій виконують самостійну роботу з курсу «Приводи верстатного та робототехнічного обладнання».

© Самостійна робота здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

Укладачі: А. Кириченко, А. Гречка, П. Єршомін, 2024

© ЦНТУ, м. Кропивницький

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
ОРГАНІЗАЦІЙНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ .....	5
СТРУКТУРА І ЗМІСТ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ .....	5
Самостійна робота «Структура, принцип дії, вибір та експрес-розрахунок крокового двигуна» .....	9
Список літератури .....	30

## ВСТУП

Мета самостійної роботи з курсу «Приводи верстатного та робототехнічного обладнання»: закріплення знань з принципу дії та устрою мехатронних систем верстатів, мехатронних модулів подачі та головного руху, алгоритмів і систем управління мехатронними системами приводів, набуття студентом практичних навичок з обрання мехатронних модулів верстатів за заданими характеристиками приводу на основі відповідних розрахунків; дослідження мехатронних модулів, параметрів приводів з кроковими двигунами.

Завдання самостійної роботи: закріплення теоретичних знань з устрою і принципу дії, а також отримання практичних навичок з вибору та налаштування мехатронних модулів, електроприводів подачі та головного руху, оснащених кроковими двигунами.

У результаті виконання самостійної роботи студент повинен знати:

типи, конструкції та технічні характеристики крокових електродвигунів, що застосовуються у приводах рухомих вузлів верстатів та роботів;

принципи вибору типу та параметрів крокових електродвигунів для приводів різного призначення;

методику розрахунку статичних та динамічних характеристик приводів металообробного обладнання з кроковими двигунами;

вміти:

обирати мехатронні модулі верстатів за заданими характеристиками приводу на основі відповідних розрахунків;

виконувати розрахунки параметрів приводів.

## **ОРГАНІЗАЦІЙНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

Самостійна робота виконується з використанням довідкової літератури, що містить інформацію про приводи з кроковими двигунами. Метою виконання самостійної роботи є набуття студентом практичних навичок з обрання мехатронних модулів верстатів за заданими характеристиками приводу на основі відповідних розрахунків, виконання базових розрахунків параметрів приводів з кроковими двигунами.

Курс самостійних робіт студента з дисципліни передбачає виконання однієї самостійної роботи.

## **СТРУКТУРА І ЗМІСТ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ**

За своєю структурою самостійна робота складається з наступних елементів:

- 1) Титульний аркуш (додаток А);
- 2) Тема та мета самостійної роботи;
- 3) Короткі теоретичні відомості;
- 4) Розрахункова частина;
- 5) Висновки.

Самостійну роботу оформлюють від руки в зошиті або друкують на одній стороні аркуша білого паперу формату А4, шрифт – Times New Roman (для виділення прикладів, понять тощо допускається використання інших шрифтів), розмір шрифту – 14, відстань між рядками 1,5 інтервали, верхній і нижній поля – 20 мм, лівий – 30 мм, правий – 10 мм. Шрифт друку повинен бути чітким. Щільність тексту повинна бути однаковою. Загальний обсяг самостійної роботи має бути до 5-7 аркушів.

## **ЗАХИСТ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ**

Звіт з самостійної роботи захищається студентом в усній формі шляхом відповіді на контрольні запитання, що наведені наприкінці самостійної роботи.

Критерії оцінювання відповідей студента контрольні запитання:

- Неправильна відповідь – 0 балів;

- Вірна відповідь – 1 бал.

Критерії оцінювання захисту виконаної самостійної роботи за національною шкалою:

- Незадовільно – 0...2 бала;
- Задовільно – 3 бали;
- Добре – 4 бали;
- Відмінно – 5 балів.

Критерії оцінювання виконання виконаної самостійної роботи:

- Невиконана самостійна робота – 0 балів;
- Виконана, але незахищена самостійна робота – 2 бала;
- Виконана та захищена самостійна робота – від 3 до 5 балів.

Загальна сума балів (ЗСБ), яку атестований студент може набрати протягом семестру під час виконання самостійної роботи – до 100. Оцінки в балах вказані по дисципліні в цілому (ЗСБ) наведені в табл.1.

Оцінювання рівня підготовки слухача під час проведення захисту самостійної роботи здійснюється за 100-бальною шкалою, національною шкалою та шкалою ЄКТС.

Таблиця 1 – Шкала відповідності оцінок

Оцінка за шкалою ЄКТС	Оцінка за 100-бальною шкалою	Оцінка за національною шкалою
A	90-100	відмінно
B	82-89	добре
C	74-81	добре
D	64-73	задовільно
E	60-63	задовільно
FХ	0-60	незадовільно

Підсумкова оцінка виставляється за наступними критеріями:

– оцінка А «відмінно» (від 90 до 100 балів) присвоюється за глибокі теоретичні та практичні знання; виконання основних завдань самостійної роботи; складання висновків з урахуванням причинно-наслідкових зв'язків і механізмів (алгоритмів) перебігу явищ (процесів), при цьому при захисті показав вміння аналізувати, порівнювати, узагальнювати, абстрагувати і конкретизувати, класифікувати і систематизувати матеріали, до вивчення яких підійшов творчо; за якісне оформлення роботи, повні і змістовні відповіді на запитання;

– оцінка В «добре» (від 82 до 89 балів) присвоюється за глибокі теоретичні та практичні знання; виконання завдань самостійної роботи; складання висновків з урахуванням причинно-наслідкових зв'язків і механізмів (алгоритмів) перебігу явищ (процесів); але при наявності в змісті роботи та її оформлення невеликих недоліків або недоліків у поданні результатів до захисту;

– оцінка С «добре» (від 74 до 81 бала) присвоюється за глибокі теоретичні та практичні знання; виконання основних завдань самостійної роботи; складання висновків з урахуванням причинно-наслідкових зв'язків і механізмів

(алгоритмів) перебігу явищ (процесів); при цьому при захисті достатньо проявив отримані вміння та навички щодо роботи з документацією та інформацією щодо результатів виконаної роботи;

– оцінка D «задовільно» (від 64 до 73 балів) присвоюється за теоретичні та практичні знання; виконання основних завдань самостійної роботи з недостатнім ступенем практичної доцільності, наявність деяких недоліків, які носять загальний характер; складання висновків без урахування причинно-наслідкових зв'язків і механізмів (алгоритмів) перебігу явищ (процесів); при цьому при захисті не достатньо проявив отримані вміння та навички щодо роботи з документацією та інформацією щодо результатів виконаної роботи;

– оцінка E «задовільно» (від 60 до 63 балів) присвоюється за теоретичні та практичні знання; виконання основних завдань самостійної роботи з недостатнім ступенем практичної доцільності, наявність деяких недоліків, які носять загальний характер; складання висновків без урахування причинно-наслідкових зв'язків і механізмів (алгоритмів) перебігу явищ (процесів); відсутність наочного представлення роботи і утруднення при відповідях на запитання;

– оцінка FX «незадовільно» (від 0 до 59 балів) присвоюється за слабкі теоретичні та практичні знання; неповне виконання основних завдань самостійної роботи; часткову відсутність розрахунків, несамотійність викладу матеріалу, висновки і пропозиції, що носять загальний характер, відсутність відповідей на запитання.

Студент вважається атестованим, якщо він набрав кількість балів (ЗСБ), що відповідає вказаній в табл. 1 в стовбцях «відмінно», «добре» або «задовільно». Студент вважається не атестованим з можливістю перездачі, якщо він набрав кількість балів (ЗСБ), що відповідає вказаній в табл.1 в стовбці «незадовільно» – FX.

До іспиту допускаються тільки ті студенти, які атестовані з виконання самостійної роботи з дисципліни.

## Самостійна робота

Тема роботи: Структура, принцип дії, вибір та експрес-розрахунок крокового двигуна.

Мета роботи: вивчити будову, принцип дії та отримати практичні навички вибору та експрес-розрахунку крокового двигуна.

Література для самопідготовки  
[1, с. 34] ; [2, с. 79];

### 1. ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Номером варіанта завдання з самостійної роботи з курсу «Приводи верстатного та робототехнічного обладнання» є порядковий номер студента у журналі академічної групи. Варіант завдання міститься в табл. 1.

Таблиця 1

Варіант	Марка двигуна	Варіант	Марка двигуна
1	SM57HT56-1006A	13	SM42HT38-1684A
2	86BHH150-600-37J	14	SM110HT150-6504A
3	SM57HT56-2804MA	15	23HS4401-T8
4	SM86HT80-5504A	16	57BHH94-400B-26B
5	43HT4340	17	43HT1340
6	57BHH56-106A-21	18	SM57HT56-2804A
7	86BHH100-500B-18	19	SM86HT156-6204A
8	57BHH56-303D-21	20	110BHH154-650A-55
9	SM86HT118-6004A	21	86BHH94-400B-28B
10	SM110HT201-8004A	22	SM57HT76-2804A
11	43HT7350	23	42BHH48W-200-24
12	57BHH56-195B-21	24	SM57HT76-3006A

Знайти і виписати в таблицю 2 основні характеристики крокового двигуна, модель якого вказана в таблиці 1. Для заповнення даних необхідно скористуватись інформацією з електронних джерел, а також провести

спрощений розрахунок обраного двигуна згідно наведеного прикладу. В звіт з самостійної роботи включити титульну сторінку, короткі теоретичні відомості, заповнену таблицю з даними крокового двигуна, проведені розрахунки та висновки.

Таблиця 2

Модель	Крок (кут повороту)	Напруга, V	Струм/ фаза, A	Опір фаза, $\Omega$	Індуктивність фаза, mH	Момент утримання, кг.см	Кількість виходів	Маса, кг	Ціна за шт. з ПДВ, грн *

\* - орієнтовна ціна вказується станом на момент оформлення роботи

Короткі теоретичні відомості:

Огляд сучасних напрямків розвитку робототехніки показує, що останніми роками найбільш активно в промислових роботах застосовуються різноманітні електроприводи. Серед їх переваг найбільш важливими є розширений діапазон моментів, зменшена інерція, можливість вбудовування за потреби електромагнітних гальм, давачів різного типу, а також хвильових передач.

Основними перевагами електроприводів можна вважати:

- високу швидкість;
- компактну конструкцію двигунів;
- плавність обертання ротора;
- великий крутний момент на валу;
- високу надійність;
- низький рівень шуму і вібрації;
- досягнення високої точності позиціонування завдяки застосуванню цифрових обчислювальних систем з імпульсними давачами;
- зручність експлуатації та обслуговування;
- доступність та відносно дешевизну електричної енергії.

Враховуючи вищенаведене, найбільш оптимальним варіантом по техніко-економічних показниках є використання в якості силового механізму для приводів верстатних та робототехнічних систем саме електродвигуни.

Серед електроприводів, що використовуються для приводів верстатів та роботів потрібно виділити силові крокові двигуни. При інших порівнянних характеристиках крокові двигуни забезпечують [3]:

- високу точність та стабільність кроку, можливість роботи з інерційними навантаженнями;
- відсутність необхідності в зворотному зв'язку (правильне проектування та настроювання схеми виключає можливість пропуску кроків);
- менша вартість в порівнянні з іншими електродвигунами;
- легкість підключення та налагодження;
- надійність, довготривалий строк експлуатації.
- невелику кількість перехідних ланок при поєднанні двигуна з цифровою системою управління;
- малу кількість внутрішніх ланцюгів зворотного зв'язку з можливістю використання повністю розімкнених систем управління;
- можливість забезпечення високої надійності, точності та завадостійкості виконавчих органів;
- можливість досягнення низьких швидкостей руху виконавчих органів при відносно високих частотах управління.

Крокові двигуни (або крокові мотори) - це особливий тип електричних двигунів, використовуються для точного позиціонування та управління рухом у різних пристроях та системах, включаючи системи ЧПУ. Ці двигуни отримали свою назву через характерний принцип роботи, де вал двигуна обертається з певним фіксованим кутовим кроком при подачі на обмотки двигуна імпульсів. Наведемо деякі ключові характеристики та особливості крокових двигунів:

Крок: Кроком крокового двигуна є мінімальний кутовий поворот його валу при подачі одного керуючого імпульсу. Поворот зазвичай вимірюється у градусах і становить деяку величину, наприклад, 0.9 або 1.8°. Це означає, що

для здійснення одного повного обороту валу двигуна потрібна певна кількість кроків (кроків на оборот).

Одноразові та дворазові кроки: Крокові двигуни можуть працювати в режимі одноразового та дворазового кроку (напівкроку), в залежності від кількості імпульсів, що подаються на двигун. У режимі дворазового кроку вал двигуна повертається на півкроку порівняно з одноразовим кроком, що дозволяє покращити роздільну здатність та точність позиціонування валу.

Високий крутний момент та відносно низька швидкість: Крокові двигуни зазвичай мають відносно низькі швидкості обертання в порівнянні з іншими типами двигунів, але при цьому мають високий крутний момент, що робить їх придатними для високоточного позиціонування.

Простота управління: Управління кроковими двигунами доволі нескладне і може бути реалізовано за допомогою простих та порівняно недорогих контролерів або драйверів. Для руху валу двигуна необхідно просто подавати певну послідовність імпульсів на керуючі обмотки.

Відсутність зворотного зв'язку: Крокові двигуни не мають вбудованого зворотного зв'язку про положення валу, тому вони «не знають» свого точного положення без використання зовнішніх датчиків. Це може бути недоліком у деяких системах, що вимагають точне позиціонування, проте в сучасних системах ЧПУ використовуються датчики зворотного зв'язку, щоб забезпечити точне позиціонування.

Відсутність зриву кроків: Зазвичай кроковий двигун відрізняється високою надійністю роботи, але якщо його перевантажити або докласти значний опір при спробі переміщення виконавчих механізмів, він може пропускати (зривати) кроки, що призводить до втрати позиції та збоїв.

Застосування крокових двигунів:

Крокові двигуни широко застосовуються в системах числового програмного управління (ЧПУ) для керування приводами по координатним осям верстатів, 3D-принтерів та ЧПУ-фрезерів для високоточного позиціонування інструментів, принтерах та сканерах для позиціонування друкувальних головок або лінійок сканерів, в робототехніці та автоматизованих

системах для управління рухом ланок та виконавчих механізмів. Також крокові двигуни використовуються в сучасному обладнанні для точної та прецизійної навігації, медичній техніці, наприклад в апаратах для томографії та діагностики. Крокові двигуни надають надійне і точне позиціонування в різних додатках і залишаються популярним вибором для завдань, де потрібне високоточне керування рухом.

Крокові двигуни відносяться до дискретних імпульсних пристроїв і використовуються для перетворення кожного імпульсу команди на керуючому вході у чітко зафіксоване переміщення вихідного валу, що має назву кроку. Такий ефект досягається за рахунок дискретної зміни режиму електромагнітного поля у повітряному проміжку між статором і ротором двигуна.

Крокові двигуни добре пристосовані до цифрового керування. Крокові двигуни за своєю конструкцією практично не відрізняються від двигунів змінного струму інших типів. Особливістю керування ними є перемикання за допомогою спеціального електронного комутатора фаз двигуна, що формує стрибкоподібне переміщення магнітного поля статора на крок, який називається тактом комутації (число імпульсів в одному періоді комутації фаз) і числом пар полюсів ротора. Особливістю крокових двигунів на відміну від двигунів інших типів є значне число пар полюсів (їх кількість може бути від 4 до 60), що визначає мале значення кроку і можливість отримання низьких швидкостей при порівняно високих частотах управління.

Наразі отримали застосування три основних типи крокових двигунів, що різняться конструкцією ротора:

- 1) З пасивним зубчатим ротором без обмоток (реактивний і індукторний);
- 2) Індукторний з двома пасивними зубчатими роторами, що аксіально з'єднані намагніченим кільцем;
- 3) З активним ротором із постійних магнітів.

До переваг крокових двигунів з активним ротором відноситься збереження магнітної фіксації ротора при від'єднанні його обмоток за рахунок

магнітного потоку ротора. Двигуни з пасивним ротором можуть бути трьох-, чотирьох-, п'яти-і шестифазними.

В основному крокові двигуни використовуються у складі приводів без редуктора. Наявність великої кількості пар полюсів у спеціальних крокових двигунах (особливо у виконанні з пасивним ротором) здійснює роль електричного редуктора, оскільки це збільшує момент обертання на валу двигуна. Таким чином, крокові двигуни у порівнянні з двигунами постійного струму при однаковому крутному моменті мають менші габарити та можуть бути з більшою швидкістю.

Основні характеристики крокового двигуна, такі як точність, стійкість руху і навантажувальна здатність, залежать від методу комутації фаз, а відповідно від способу керування. Найпростішим і найбільш поширеним є метод послідовного перемикання однієї чи групи фаз, що отримав назву природньої комутації. При такому методі комутації струм в фазах крокового двигуна набуває лише два значення: 0, коли фаза відключена та  $I_{\text{ном}}$  – коли фаза збуджена.

Крок двигуна визначається числом тактів комутації, що залежить від числа фаз  $m$ . При симетричній комутації  $n=m$ . Несиметрична комутація дає можливість збільшити число тактів комутації вдвічі  $n = 2m$ , зменшивши крок двигуна в два рази у порівнянні з симетричною.

Симетрична комутація може бути почерговою – в кожний момент часу включена тільки одна фаза крокового двигуна, і парною – у кожний момент часу включено дві фази.

Симетрична комутація дозволяє отримати постійні значення амплітуди результуючого вектору моменту в кожному такті комутації. Навантажувальна здатність крокового двигуна між тактами не змінюється, що забезпечує менші зміни швидкості і кута повороту. В більшості випадків для чотирифазних крокових двигунів використовується парна комутація фаз, яка збільшує стійкість руху і момент двигуна приблизно в  $\sqrt{2}$  раз у порівнянні з почерговою комутацією фаз.

Несиметрична комутація широко застосовується для підвищення стійкості руху в діапазоні частот електромеханічного резонансу і для зниження кроку.

Перевагами такої комутації є можливість застосування її для зменшення дискретності руху приводу, так як схема блоку керування практично не залежить від числа тактів комутації. Недоліком несиметричної комутації є коливання амплітуди результуючого вектору моменту між тактами, що приводить до збільшення коливань кута повороту і швидкості.

Кроковий двигун – це електричний двигун, в якому імпульсне живлення електричним струмом призводить до того, що його ротор не обертається неперервно, а виконує щоразу обертальний рух на заданий кут. Завдяки цьому, кут повороту ротора залежить від числа поданих імпульсів струму, а кутова швидкість ротора точно рівна частоті імпульсів помноженій на кут повороту ротора за один цикл роботи двигуна.

Кут повороту двигуна під впливом одного імпульсу може мати різні значення, в залежності від конструкції двигуна, – як правило це значення в діапазоні від декількох градусів до декількох десятків градусів. Крокові двигуни, залежно від призначення пристосовані до виконання від частки обороту в секунду до декількох тисяч оборотів в секунду.

Існують три основні типи крокових двигунів: змінної індуктивності, двигуни з постійними магнітами, і гібридні двигуни (рис. 1). Двигуни змінної індуктивності використовують магнітне поле, що тільки генерується, на центральному валу, примушуючи обертатися і знаходитися на одній лінії з напругою електромагнітів. Двигуни з постійними магнітами схожі на них, за винятком того, що центральний вал поляризований у північного і південного магнітних полюсів, які відповідним чином повертатимуть його залежно від того, які електромагніти включені. Гібридний мотор – це поєднання двох попередніх. У його намагніченого центрального валу є два набори зубів для двох магнітних полюсів, які потім шикуються в лінію із зубами уздовж електромагнітів. У зв'язку з подвійним набором зубів на центральному валу,

гібридний двигун має як найменший доступний розмір кроку і тому є одним з найпопулярніших типів крокових двигунів.

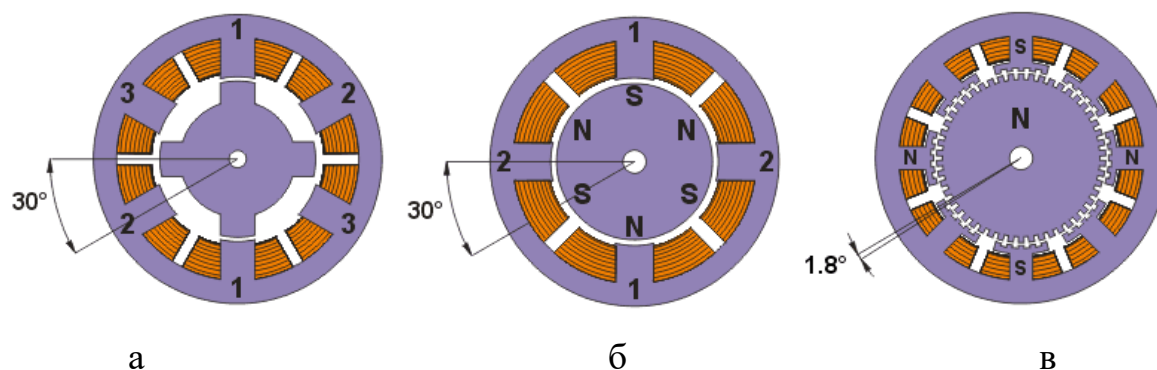


Рисунок 1 - Типи крокових двигунів: а - змінної індуктивності; б - з постійними магнітами; в – гібридний.

Крім того, крокові двигуни відрізняються один від одного за способом живлення. Існують уніполярні та біполярні двигуни.

Кроковий двигун є уніполярним у тому випадку, коли відведення від середини обмоток об'єднані між собою усередині самого двигуна. Таким чином, користувачеві доступно лише 5 виводів, що буває у край рідко.

Розглянемо принцип дії крокового двигуна на дуже спрощеній схемі його магнітної частини. Такий двигун має 4 кроки на один оберт ротора (рис. 1).

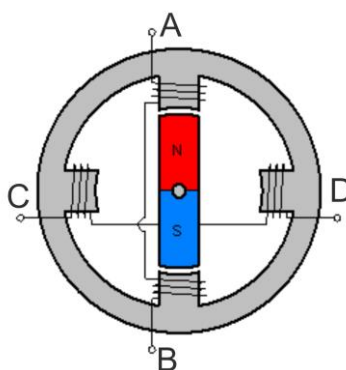


Рисунок 1 – Спрощена схема магнітної частини крокового двигуна.

На статорі розміщені дві групи обмоток А-В і С-Д, ротор – постійний магніт. У відсутності току в обмотках ротор-магніт «примагнічується» до полюсів статора і може займати чотири стійких положення (рис. 2).

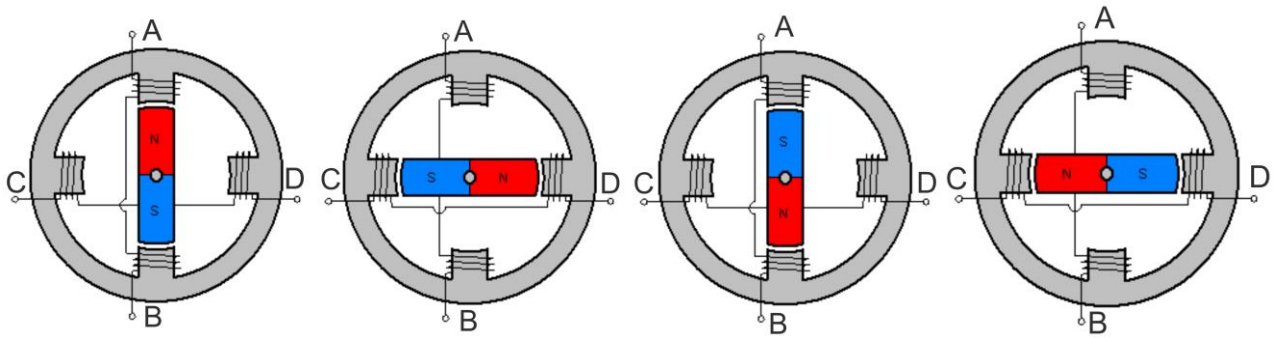


Рисунок 2 – Чотири стійких положення крокового двигуна

У двигуна є дві абсолютно однакові групи обмотки: А-В і С-Д. Пропускаючи через них струм певної величини і певного напрямку, ми можемо намагнічувати сердечник статора на свій розсуд, і це буде викликати зміну положення ротора-магніта. Також двигун може працювати в напівкроковому режимі. Це означає, що кроковий двигун, який має лише чотири стійкі стани, зможе здійснювати вісім кроків на один повний оберт ротора, тобто в два рази більше.

Розглянемо поетапно, як відбувається обертання крокового двигуна в напівкроковому режимі, як і які струми ми при цьому повинні пропускати через його обмотки.

Роботу крокового двигуна можна розбити на «ділянки», що повторюються. Кожна «ділянка» містить чотири різні стани двигуна (у напівкроковому режимі - вісім різних станів). Після проходження цих станів починається наступна «ділянка» і все повторюється спочатку.

Крок №1 (напівкрок №1). У цьому стані йде струм лише через обмотку А-В, причому в напрямі від клеми «А» до клеми «В». Для цього на клему «А» подається «+» від джерела живлення, а на клему «В» - мінус. Струм через обмотку підтримується на рівні гранично-допустимого струму для крокового двигуна (для прикладу оберемо - 3 Ампера, візьмемо його за 100%). Ротор займає положення напроти полюсів обмотки А-В. Виводи обмотки С-Д закорочені між собою (для зниження явища резонансу) (рис. 3).

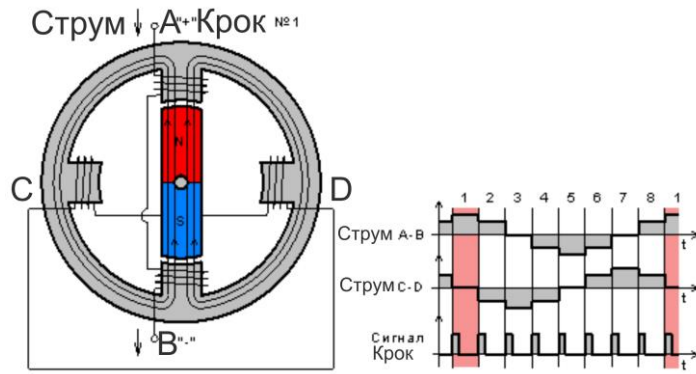


Рисунок 3 - Крок №1 (напівкрок №1)

Крок №2 (напівкрок №2). У цьому стані струм йде відразу через обидві обмотки крокового двигуна. Причому, через обмотку А-В струм йде в напрямі від клемки «А» до клемки «В», тоді як через обмотку С-Д струм йде від клемки «D» до клемки «С». Для цього «+» від джерела живлення подається на клемки «А» і «D», а мінус - на клемки «В» і «С». Величина струму через кожен обмотку підтримується на рівні 71% від максимального значення, тобто на рівні 2,13А. Це пов'язано з тим, що працюють відразу обидві обмотки, і, щоб не перегріти двигун потрібно на кожен обмотку давати знижений струм. Цифра 71% виходить з теплового балансу - при цьому дві обмотки виділяють стільки ж тепла, скільки одна обмотка виділяла б при 100% струму.

Коли струм йде відразу через дві обмотки, ротор повертається на півкроку і займає положення між полюсами статора (рис. 4).

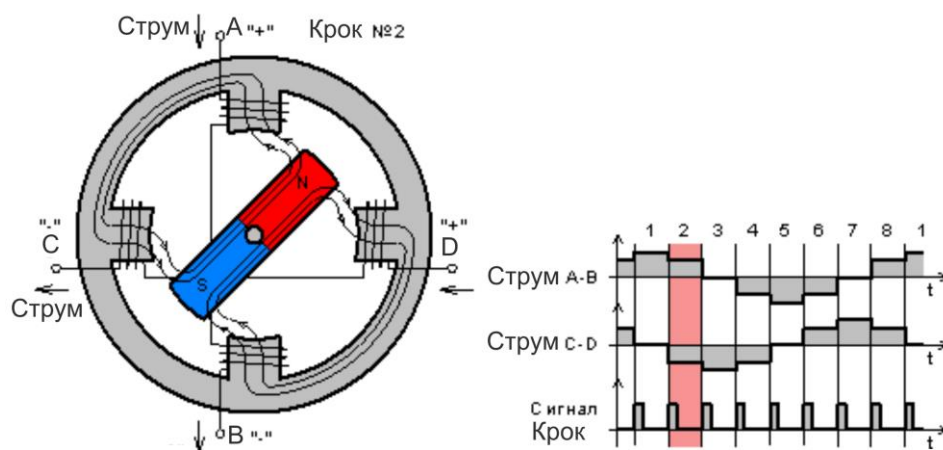


Рисунок 4 - Крок №2 (напівкрок №2)

Крок №3 (напівкрок №3). У цьому стані струм йде лише через обмотку С-Д крокового двигуна. Напрямок струму - від клемки «D» до клемки «С» ("+"

джерела живлення подається на клему «D», мінус - на «C»). Величина струму - 100% (3A). Ротор повертається ще на півкроку і займає положення напроти полюсів обмотки С-D. Обмотка А-В замкнута (для зниження явища резонансу) (рис. 5).

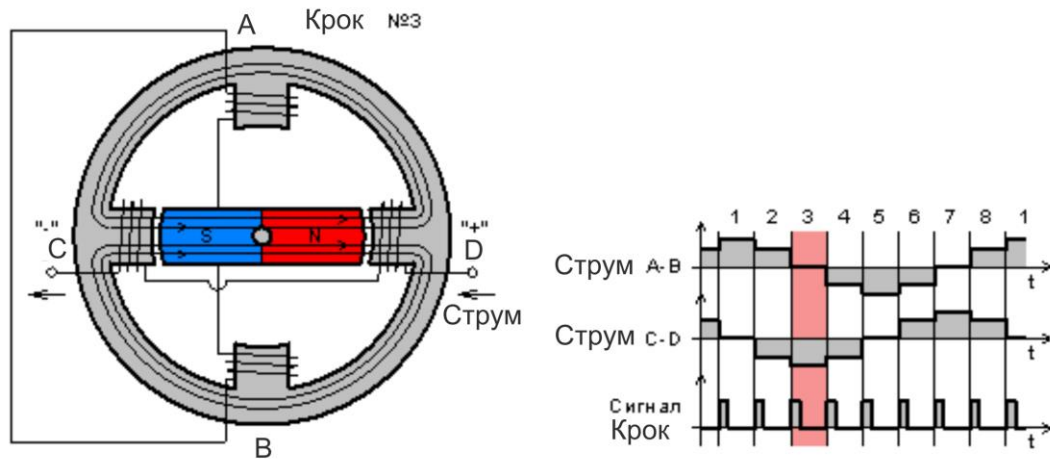


Рисунок 5 - Крок №3 (напівкрок №3)

Крок №4 (напівкрок №4). Струм знову йде відразу через обидві обмотки крокового двигуна. Причому, через обмотку А-В струм йде вже в напрямі від клемки «В» до клемки «А», тоді як через обмотку С-D як і раніше від клемки «D» до клемки «С». Для цього «+» від джерела живлення подається на клемки «В» і «D», а мінус - на клемки «А» і «С». Величина струму через кожен обмотку підтримується на рівні 71% (2,13A). Ротор повертається ще на півкроку і знову займає положення між полюсами статора (рис. 6).

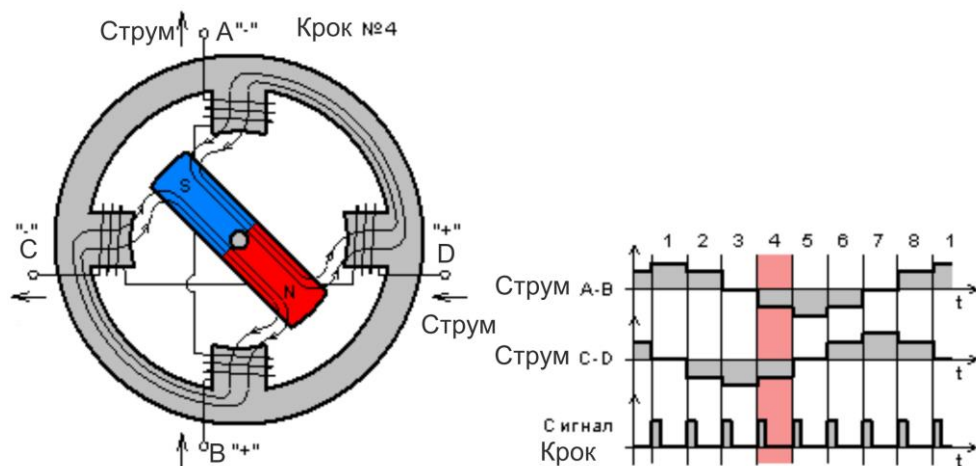


Рисунок 6 - Крок №4 (напівкрок №4)

Крок №5 (напівкрок №5). У цьому стані, як і на кроці №1, струм знову йде лише через обмотку А-В крокового двигуна. Але напрям струму -

зворотній, від клем «В» до клем «А» («+» джерела живлення подається на клему «В», мінус - на «А»). Величина струму - 100% (3А). Ротор повертається ще на півкроку і займає положення напроти полюсів обмотки А-В. Обмотка С-Д замкнута (для зниження явища резонансу) (рис. 7).

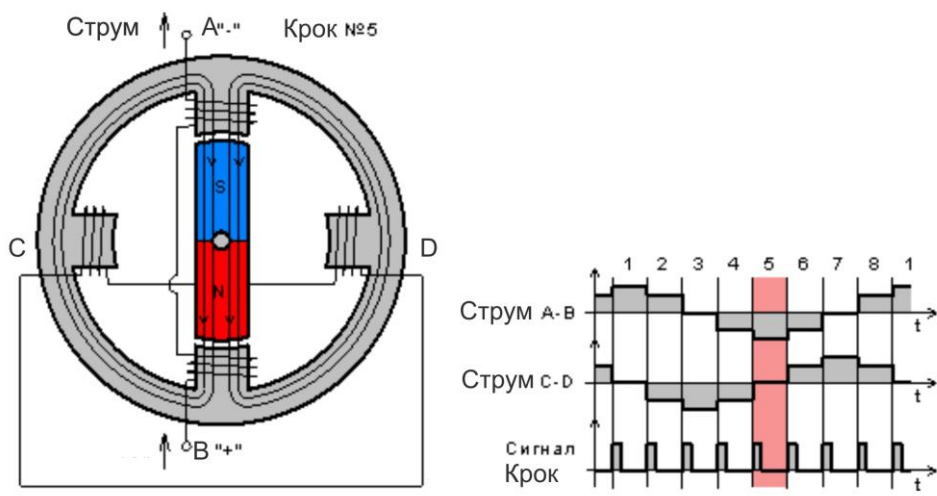


Рисунок 7 - Крок №5 (напівкрок №5)

Крок №6 (напівкрок №6). Струм знову йде відразу через обидві обмотки крокового двигуна. Через обмотку А-В як і раніше, в напрямі від клем «В» до клем «А», проте через обмотку С-Д вже у зворотний бік - від клем «С» до клем «Д». Для цього «+» від джерела живлення подається на клемі «В» і «С», а мінус - на клемі «А» і «Д». Величина струму через кожен обмотку підтримується на рівні 71% (2,13А). Ротор повертається ще на півкроку і знову займає положення між полюсами статора (рис. 8).

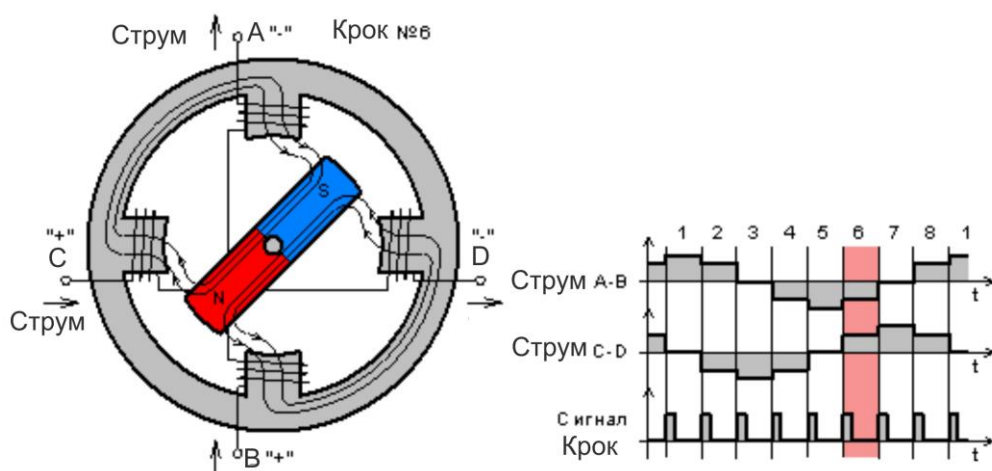


Рисунок 8 - Крок №6 (напівкрок №6)

Крок №7 (напівкрок №7). Схожий на крок №3, але з точністю навпаки. Струм знову йде лише через обмотку С-Д крокового двигуна. Але напрям

струму - зворотній, від клемі «С» до клемі «D» («+» джерела живлення подається на клему «С», мінус - на «D»). Величина струму - 100% (3А). Ротор повертається ще на півкроку і займає положення напроти полюсів обмотки С-D. Обмотка А-В замкнута (для зниження явища резонансу) (рис. 9).

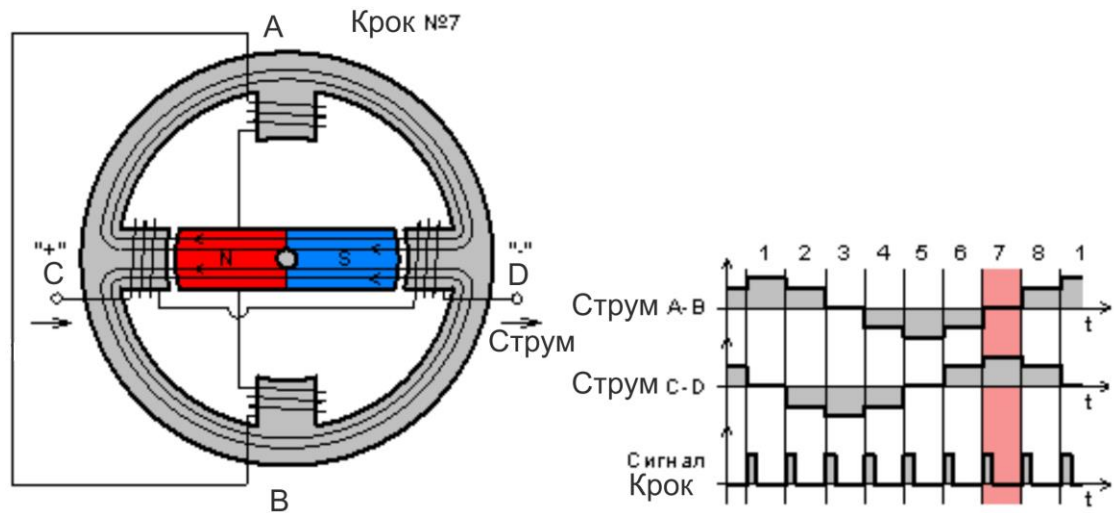


Рисунок 9 - Крок №7 (напівкрок №7)

Крок №8 (напівкрок №8). Струм знову йде відразу через обидві обмотки крокового двигуна. Але напрям його через обмотку знову помінявся. Як на кроках №1 і №2 його напрям тепер став від клемі «А» до клемі «В». Через обмотку С-D струм продовжує йти від клемі «С» до клемі «D». Для цього «+» від джерела живлення подається на клемі «А» і «С», а мінус - на клемі «В» і «D». Величина струму через кожну обмотку підтримується на рівні 71% (2,13А). Ротор повертається ще на півкроку і знову займає положення між полюсами статора (рис. 10).

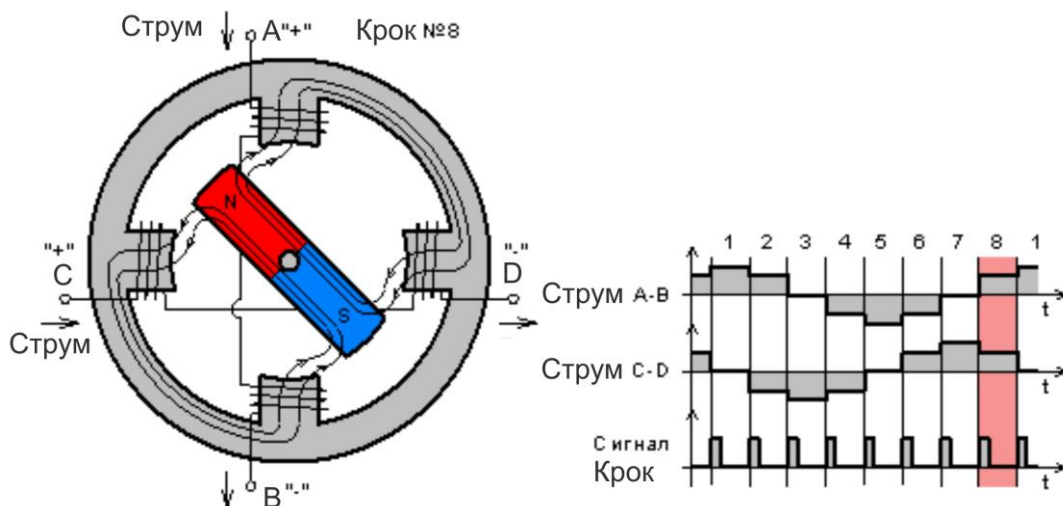


Рисунок 10 - Крок №8 (напівкрок №8)

Із приходом на драйвер крокового двигуна чергового імпульсу сигналу «КРОК», поточна «ділянка» роботи крокового двигуна закінчується, відбувається перехід в наступну «ділянку», і знову «встаємо» на крок №1.

Реальний кроковий двигун може забезпечити 200 (400) кроків на оберт ротора. Для цього розглянемо будову ротора крокового двигуна (рис. 11).

Він складається з трьох однакових секцій, розділених між собою кільцями з алюмінію, - алюміній немагнітний матеріал. Кількість секцій (1, 2 або 3) залежить від розміру крокового двигуна, чим довше двигун - тим більше секцій. Кожна секція, у свою чергу, складається з двох пакетів електротехнічної сталі, розділених досить сильним магнітом

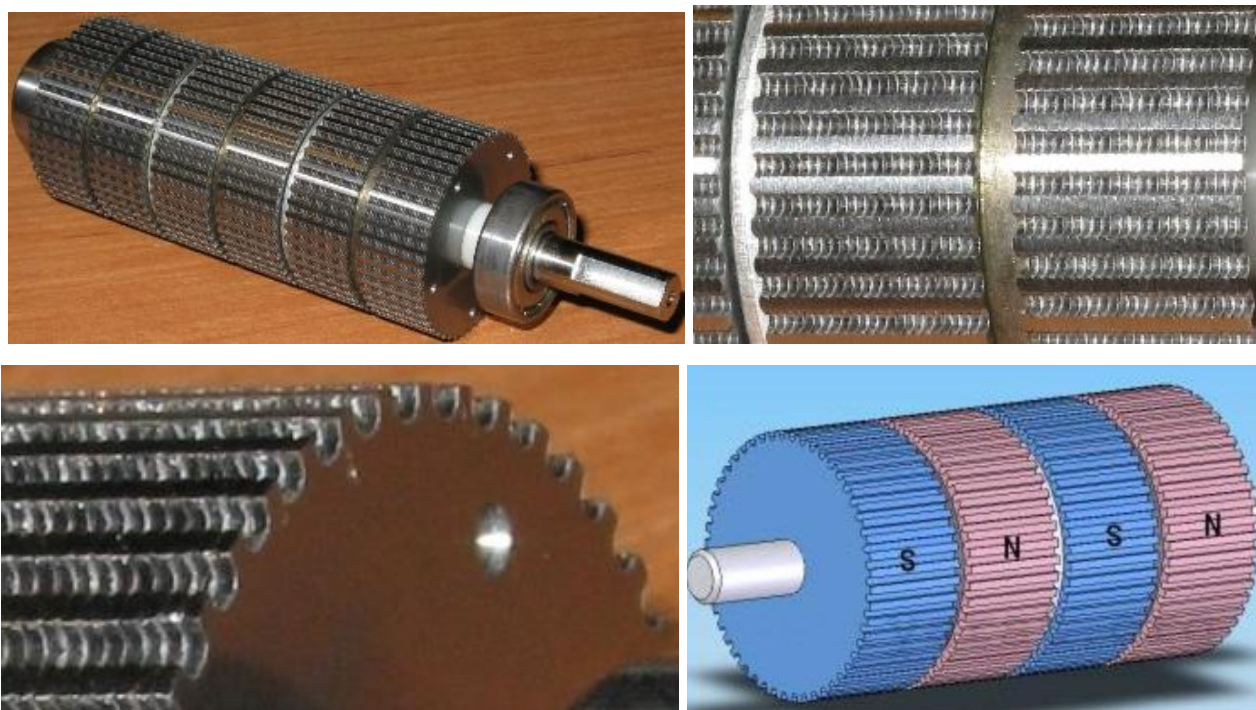


Рисунок 11 – Будова ротора крокового двигуна

Пакети мають по колу зубці, таким чином, зубці одного пакету стають «південним» полюсом, а зубці іншого пакету - північним. Слід також відзначити, що зубці «південного» і «північного» полюсів зрушені один відносно одного на півзубця.

На статорі теж є зубці, але вони не мають зсуву по довжині (по вісі) і йдуть рівно на всю довжину крокового двигуна (рис. 12).

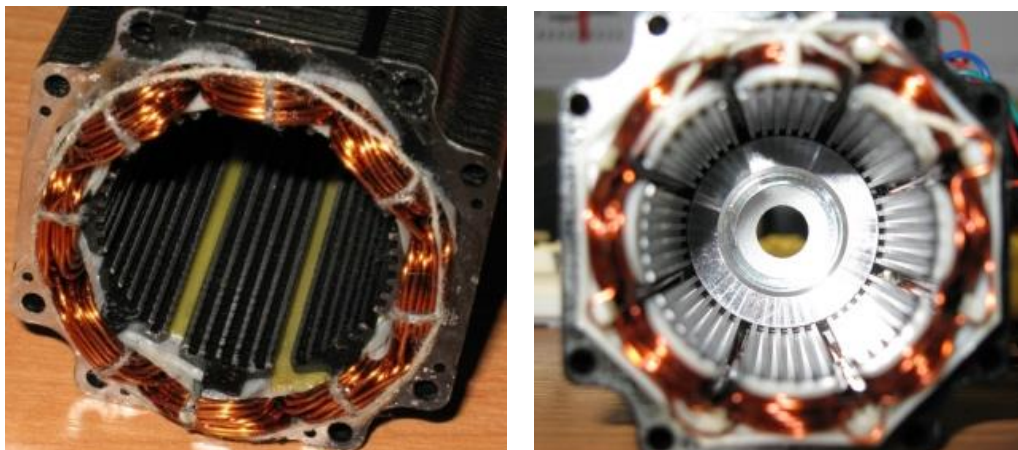


Рисунок 12 – Статор крокового двигуна

Видно, що двигун має вісім обмоток, ці обмотки сполучені в дві групи по чотири обмотки в кожній. При пропусканні струму через одну з груп обмоток (наприклад, через «жовту»), полюси статора намагнічуються, і між ними створюється магнітне поле (рис. 13).

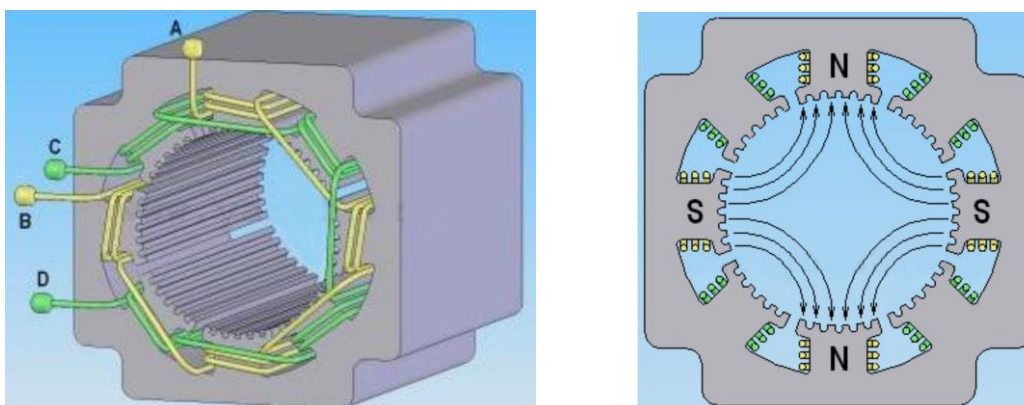


Рисунок 13 - Статор крокового двигуна (3D модель)

Ротор і статор в зборі зображений на рисунку 14.

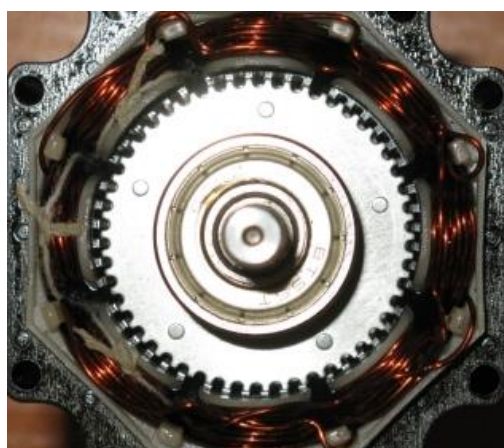


Рисунок 14 – Ротор і статор в зборі



Рисунок 15 – Загальний вигляд крокового двигуна

На рис. 14 показано вісім обмоток на статорі. Для зручності їх позначення уявимо, що це циферблат годинника. Так, саму верхню обмотку назвемо «12 годин», саму нижню – «6 годин», і так далі.

Обмотки «12 годин», «3:00», «6:00» і «9:00» - це група обмоток з клемми А-В.

Обмотки «1:30 годин», «4:30», «7:30» і «10:30» - це група обмоток з клемми С-Д.

Видно, що є хороший збіг зубців ротора і статора напроти обмоток «12:00» і «6:00», але оскільки полюси ротора зміщені на півзубця, це означає хороший збіг зубців ротора і статора зворотного полюса напроти обмоток «3:00» і «9:00».

Якщо тепер ми подаємо струм в обмотку С-Д, у нас намагнітяться полюси «1:30», «4:30», «7:30» і «10:30», і ротор обернеться на чверть зубця управо або вліво (залежно від того, якого напрямку струм буде пущений через групу обмоток С-Д). В цьому випадку, чітко збігатимуться зубці напроти полюсів групи обмоток С-Д і ротор займе наступне стійке положення. І так далі.

Вибір крокового двигуна та розрахунок його потужності є важливим питанням. Від правильного вибору буде залежати кінцева вартість обладнання та економічний ефект від його використання. Наприклад, такий важливий параметр, як крутний момент на валу двигуна дозволяє теоретично розрахувати, чи вистачить потужності у обраної моделі двигуна для приводу того механізму, де планується його використання. Якщо кроковий двигун планується застосовувати для приводів подач на металорізальному верстаті з ЧПУ, то велике значення має швидкість обертання валу двигуна. Також велике значення має коефіцієнт корисної дії (ККД) передачі в приводі. Так, ККД традиційної передачі «гвинт-гайка» з трапецеїдальною різьбою становить 0.3, а сучасна кульково-гвинтова передача вже має ККД 0.9-0.95 [5]. Якщо подивитись на напрямні, то вибір напрямної кочення замість напрямної ковзання також дозволить значно підвищити ККД.

Зазвичай, виробники крокових двигунів в рекламних проспектах вказують величину моменту стопоріння на валу. А на практиці реальний робочий момент обраної моделі буде менший. Щоб запобігти такому розходженню, треба знайти та ознайомитись з графіком залежності крутного моменту від швидкості і від напруги живлення в технічній документації/карті даних (datasheet) на двигун. Відомо, що тим більша напруга живлення, тим більший крутний момент. Використання редуктора в приводі також дозволить застосувати двигун з меншим крутним моментом, але швидкість переміщення буде меншою.

## 2. Приклад виконання спрощеного розрахунку

### 2.1. Розрахунок крокового двигуна

Основна формула для розрахунку крутного моменту:

$$M_{кр} = F \times L,$$

де  $M_{кр}$  – крутний момент, Н·м;

$F$  – сила, Н

$L$  – відстань від центру обертання валу до точки, де прикладена сила, м.

Визначення прикладеної сили  $F$ . Сила, прикладена до валу двигуна, може відрізнятися в залежності від його застосування. Наприклад, якщо потрібно розрахувати крутний момент двигуна, який використовується у механізмі для підйому вантажу, прикладена сила дорівнюватиме максимальній вазі, яку він може підняти. Якщо обчислюється крутний момент двигуна, який використовується для приводів верстата з ЧПУ, прикладена сила може дорівнювати силі, необхідній для переміщення механізмів.

Вимірювання відстані  $L$  від центру обертання осі валу до точки прикладання сили здійснюється за допомогою лінійки або штангенциркуля. Важливо, щоб вимірювання проводилось між відточкою осі обертання двигуна та точкою, де сила прикладена перпендикулярно до неї.

Обов'язково треба використовувати однакові одиниці вимірювання для обох величин. Якщо сила  $F$  вимірюється в ньютонках, а відстань  $L$  – у метрах, крутний момент обчислюватиметься в ньютон-метрах (Н·м).

Додаткові фактори: У деяких випадках в розрахунках потрібно врахувати додаткові фактори, щоб отримати точний розрахунок крутного моменту на валу двигуна. Це, наприклад, коефіцієнт тертя в підшипниках двигуна, ефективність системи приводу та додаткові навантаження на двигун. Ці фактори знижують фактичну продуктивність двигуна і повинні бути враховані коефіцієнтами в розрахунку.

Для розрахунку крутного моменту на валу двигуна імпортного виробництва потрібно знати потужність крокового двигуна в кінських силах (horse power) або в кіловатах (kW), швидкість обертання валу в обертах за хвилину (RPM) і коефіцієнт служби двигуна.

Переведення величин: 1 к. с. = 0,746 кВт.

Переведення швидкості обертання валу в радіани за секунду здійснюється за формулою:  $1 \text{ RPM} = 0,1047 \text{ рад/с}$ .

Тоді обчислення крутного моменту здійснюється за такою формулою:  $M_{\text{кр}} \text{ (Нм)} = P \text{ (кВт)} / V \text{ (рад/с)}$ .

Експлуатаційний коефіцієнт - це міра навантаження, яке двигун може витримати протягом певного періоду часу його роботи. Якщо двигун працює з повним навантаженням, то цей фактор не враховується.

В сучасному машинобудуванні широкого застосування в механізмах верстатів та промислових роботах набули крокові двигуни [5].

При виборі крокового двигуна необхідно звертати увагу на наступні критерії:

Індуктивність. Висока індуктивність забезпечить можливість для більшого крутного моменту, але також потребує драйвер з високою напругою живлення. При підборі двигуна необхідно обрахувати квадратний корінь з індуктивності і перемножити отримане значення на 32. Отримане значення необхідно порівняти із значенням напруги джерела живлення для драйвера - числа не повинні сильно відрізнятись. Якщо напруга живлення більше ніж на 30% буде сильно грітись та шуміти двигун. А якщо менше - крутний момент буде занадто швидко спадати зі швидкістю.

Графік залежності крутного моменту від швидкості. Дозволить визначити, чи задовольняє обраний двигун умовам ТЗ.

Геометричні параметри двигуна.

Проведемо експрес розрахунок крокового двигуна на прикладі. Для розрахунку будемо користуватись наступними параметрами:

Коефіцієнт тертя в напрямних  $\mu = 0,2$ ;

Вага деталі -  $m_d = 2$  кг;

Вага столу -  $m_c = 26$  кг;

Сила різання -  $P = 1000$  Н;

Швидкість переміщення -  $V = 0,5$  м/с;

Необхідне прискорення -  $a = 2$  м/с<sup>2</sup>.

Розрахуємо силу тертя в напрямних за формулою (1), для цього необхідно перемножити коефіцієнт тертя на вагу системи:

$$F_T = \mu g (m_d + m_c) = 0,2 \cdot 9,81 \cdot (2 + 26) = 54,936 \text{ Н} \quad (1)$$

Визначимо силу інерції, перемноживши масу столу з деталлю на необхідне прискорення:

$$F_I = a \cdot (m_d + m_c) = 2 \cdot 28 = 56 \text{ Н} \quad (2)$$

Визначимо повну силу опору, для цього потрібно знайти суму сил тертя, інерції та різання:

$$F_o = F_T + F_I + P = 54,936 + 56 + 1000 = 1110,936 \text{ Н} \quad (3)$$

Розрахуємо необхідну потужність двигуна (4) та механічну потужність (5). Оскільки у формулі відсутня інерція самого крокового двигуна та інших обертових механізмів тому за рекомендаціями джерела [5] для підвищення точності розрахунку рекомендується збільшити або зменшити вимоги щодо прискорення на 10%.

$$N = a \cdot (m_d + m_c) = 2,2 \cdot 28 = 61,6 \text{ Н} \quad (4)$$

$$N = F_o \cdot V = 1110,936 \cdot 0,5 = 555,468 \text{ Вт} \quad (5)$$

Для визначення крутного моменту крокового двигуна в пристрої за допомогою гвинтової передачі скористаємось розрахунковою схемою рис. 16.

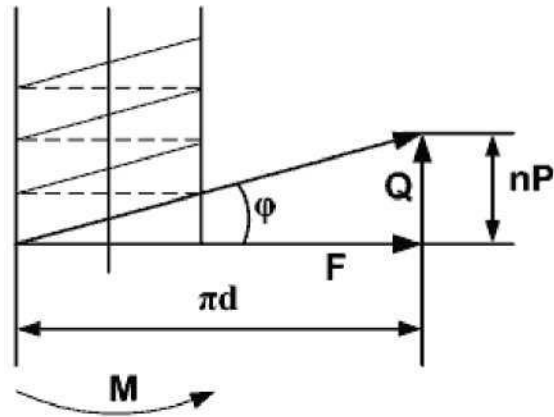


Рис. 16. Розрахункова схема для визначення крутного моменту крокового двигуна в системах з гвинтовою передачею [5]:  $d$  - діаметр гвинта;  $P$ -крок гвинта;  $n$ - кількість заходів;  $Q$  - осьова сила;  $F$ - сила опору.

Звідси:

$$M = F_o \cdot d/2 = 1110,936 \cdot 16 \cdot 10^{-3}/2 = 20.42 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (6)$$

За отриманими розрахунками підбираємо двигун. Найближчим за показниками є кроковий двигун НЕМА 23HS8230 з наступними показниками:

- Фланець - 57мм;
- Довжина - 82 мм;
- Діаметр вихідного валу - 8 мм;
- Підключення - 4 дроти, 2 фази;
- Номінальний струм - 3 А;
- Маса - 1,4 кг;
- Крок -  $1,8^\circ \pm 5\%$ ;
- Утримуючий момент - 22 кг/ см.

Контрольні запитання:

1. Які існують основні типи крокових двигунів?
2. Як відрізняються крокові двигуни один від одного за способом живлення?
3. Яким чином викликається зміна положення ротора-магніта в кроковому двигуні?
4. Чому під час роботи відразу обох обмоток крокового двигуна величина струму через кожен обмотку підтримується на рівні 71% від максимального значення?

5. За рахунок чого відбувається обертання крокового двигуна в напівкроковому режимі?
6. Для чого замикаються між собою виводи обмотки С-D при подачі напруги на виводи обмотки А-В?
7. Від чого залежить кількість секцій (1, 2 або 3) ротора крокового двигуна?
8. Які основні переваги крокових двигунів у порівнянні з іншими типами електродвигунів?

## Список літератури:

### Основна:

1. Механотроніка: Конспект лекцій / уклад. Н. М. Гулієва. – Луцьк: Луцький НТУ, 2015. – 104 с.
2. Мехатроніка : Підручник / Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Крушельницький В.В. – Київ. : Національний університет біоресурсів і природокористування, 2020. – 404 с.
3. KENNAMETAL [Електронний ресурс] / Інженерний калькулятор для розрахунку режимів різання:  
<https://www.kennametal.com/us/en/resources.html>

### Допоміжна

4. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : Навч. посіб. для вищ. навч. закл. / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський та ін. – К. : Либідь, 2005. – 680 с.
5. CNC-market [Електронний ресурс] / Крокові двигуни та їх властивості:  
<http://surl.li/qaaife>