

consumed electricity for the needs of consumers-regulators, a system of constraints caused by the load capacity of transformers and the required amount of electricity to perform the technological process, figured out the capacity of the consumers-regulators. The trade-offs between the constituents of the objective function are taken into account by the weighting coefficients of the peer review method.

4.2 Development and experimental research of transverse magnetic flux machine with a disk rotor

Як відомо, електричні машини з постійними магнітами (ПМ) демонструють вищу ефективність, більшу надійність ніж машини з електромагнітним збудженням. Серед електричних машин з ПМ окремим класом відокремлюються електричні машини з поперечним магнітним потоком (ЕМПП) завдяки конструктивним особливостям магнітної системи та створенню кращих показників питомого обертального моменту, ніж машини інших типів. За останні 50 років в цьому класі електричних машин було представлено велику кількість конструкцій та модифікацій, що впливають на обертальний момент та енергетичні показники електричної машини. Модифікації ЕМПП включають зміну форми магнітної системи статора, застосування магнітних шунтів, розташування статора відносно вісі обертання та ін. Під час вдосконалення конструкції велику увагу приділяють спрощенню виробничого процесу та розробці технологічної конструкції ЕМПП.

В останній час виникла тенденція до зменшення об'єму електричних машин та збільшення їх питомого обертального моменту. Також з розвитком робототехніки та індивідуальних засобів руху (гіроборд, моноколесо та ін.), де ці параметри особливо важливі, проектування високомоментних низькооберткових електричних машин набуває затребуваності (рис.35).

ЕМПП можуть бути виконані як із зовнішнім, так і з внутрішнім ротором в формі диска або циліндра. Також застосовуються машини, що орієнтовані на лінійне переміщення.



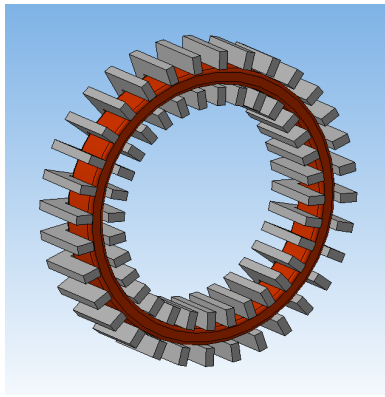
абв з

Рисунок 35. Приклади застосування високомоментних
низькооберткових електричних машин:

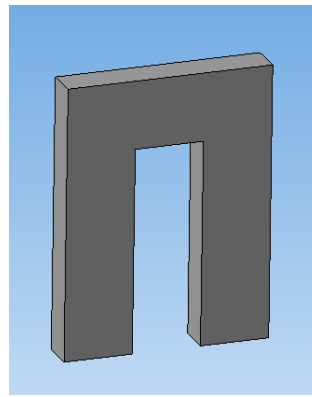
a – електросамокат Razor E300; *б* – моноколесо NineBot One A1;
в – робот-маніпулятор FANUC, Японія; *з* – робот-маніпулятор Genesys

В роботах [115] та [116] представлені ЕМПІ з дисковим та циліндричним ротором відповідно. Незалежно від знаходження та форми ротора, автори приходять до висновку, що кількість осердь статора знаходиться в межах від 28 до 34 штук на фазу при умові, що створюється максимальний обертальний момент. При цьому геометричні розміри приблизно однакові і зовнішній діаметр машини не перевищує 200 мм. Тому в якості прототипу обрана машина з поперечним магнітним полем з внутрішнім розташуванням ротора у формі диску та кількістю осердь статора на фазу 32 штук. Її конструкцію та принцип дії розглянуто далі.

Статор машини складається з двох половин (фаз), кожна з яких виконана з кільцевої обмотки, на якій рівномірно розташовані П-подібні осердя, що виконують роль магнітопроводів (рис. 36,*а*). Кожен такий магнітопровід складається з двох зубців, які з'єднані ярмом (рис. 36,*б*). На торцевій поверхні ротора розташовано постійні магніти, кількість яких перевищує кількість П-подібних осердь у два рази, що пов'язано із зміною напрямку магнітного потоку при синусоїдальному живленні. На рис. 3 показана загальна конструкція дискового ротора ЕМПІ.



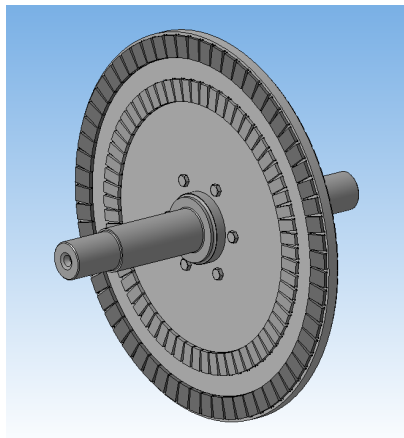
a



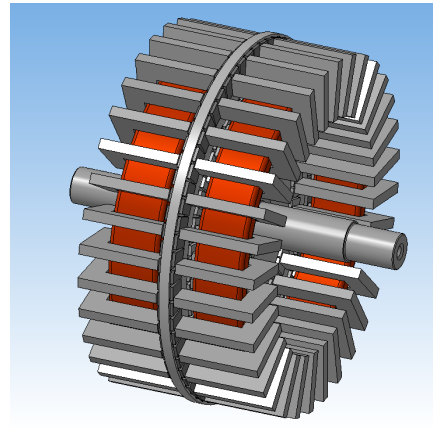
б

Рисунок 36. Конструкція 1 фази статора ЕМПШ

a – одна фаза статора; *б* – полюс статора.



a



б

Рисунок 37. Конструкція ЕМПШ з дисковим ротором

a – дисковий ротор; *б* – ЕМПШ з дисковим ротором без корпусу.

За своїм принципом дії ця електрична машина подібна до синхронної машини з постійними магнітами, тому при підключенні до мережі з синусоїдальною напругою живлення в обмотці статора буде протікати струм та створюватись магнітне поле статора, яке буде пульсуючим, а не обертальним на відміну від синхронної машини класичної конструкції. Створене магнітне поле статора почне взаємодіяти з магнітним полем ПМ ротора та приводити їх в рух та переміщувати в положення з найменшим магнітним опором, тобто постійні магніти ротора розташуються навпроти зубців магнітопроводів статора. Такий

процес призведе до виникнення обертального моменту, який поступово буде зростати до максимального, а потім буде зменшуватись із зменшенням амплітуди напруги живлення та потраплянням ПМ ротора до позиції із найменшим магнітним опором.

Для створення подальшого обертання необхідна друга фаза статора. При цьому осердя статора другої фази розміщено навпроти осердь статора першої фази, а магніти фаз ротора зміщено на деякий кут, або навпаки(рис.38). Тобто частина полюсів статора завжди знаходяться між різнополярними магнітами ротора. Таким чином, при наявності струмів (зсунутих на 90 градусів по фазі) в обмотках статора, на ротор буде постійно діяти тангенціальна складова сили тяжіння, створюючи обертальний момент ротора. Такий принцип побудови магнітної системи відноситься і до трифазних та багатофазних ЕМПП. Залежність обертального моменту від струму і кута положення ротора є нелінійною функцією і характеризується значними пульсаціями (до 20% від номінального значення).

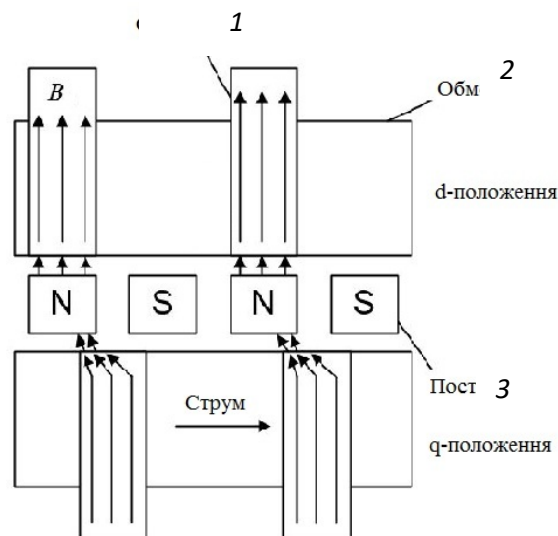


Рисунок38. Принципова будова двофазної ЕМПП

1 – осердя статора; 2 – обмотка статора; 3 – постійні магніти.

В останні десятиліття активно ведеться робота по збільшенню питомого обертального моменту ЕМПП і, як результат, створено значну кількість різних конструктивних виконань цих машин. Високий питомий обертальний момент в ЕМПП досягається завдяки двом основним властивостям: по-перше, на відміну

від класичних електричних машин з повздовжнім поширенням магнітного потоку, в ЕМПП шлях замикання магнітного потоку в магнітопроводі і струм в обмотці умовно не залежать одне від одного і можуть бути оптимізовані окремо; по-друге, обмотка статора не має лобових частин і тому її маса, зовнішні габарити та магнітний потік розсіювання на 25–30% менше, ніж у класичних електричних машин. [117].

Кожна електрична машина, що випускається серійно має свою методику розрахунку експлуатаційних характеристик та геометричних розмірів, що базується на великій кількості експериментальних досліджень, емпіричних коефіцієнтах та спрощеннях. Розрахунок ЕМПП використовує існуючі методи для аналізу магнітного поля: чисельно-польовий, закон повного струму, схеми заміщення. Останні два методи мають декілька спрощень щодо розподілу магнітного поля та насичення магнітної системи, але дають уявлення про габаритні розміри ЕМПП, які уточнюються при використанні чисельно-польового методу. Цей метод розрахунку магнітного кола реалізовано у таких програмах як FEMM, ANSYS Maxwell, Comsol та інші.

Ці програми дозволяють за короткий час визначити оптимальну магніторушійну силу (МРС), а критерієм оптимальності є насичення магнітної системи осердь статора та ротора, а також зробити параметризацію та оптимізацію постійних магнітів при заданому критерії. Це суттєво спрощує процес проектування ЕМПП. В першу чергу створюється магнітна система ЕМПП у тривимірній постановці за допомогою програм тривимірного моделювання (наприклад КОМПАС-3D, SolidWorks і т.д.) та імпортується в середовище ANSYS Maxwell. Далі задаються основні властивості магнітопровідникових матеріалів, а саме: крива намагнічування матеріалів осердь статора та ротора, напрям шихтовки полюсів статора, обмоткові дані, напрям намагнічування магнітів, їх тип та магнітні властивості, та інші нюанси моделі для максимального наближення її до експериментального зразка (рис.39).

Головні розміри дослідницької 32-полюсної конструкції ЕМПП представлені на рис.40, зовнішній діаметр магнітної системи моделі складає 180 мм, а осьова довжина – 94 мм.

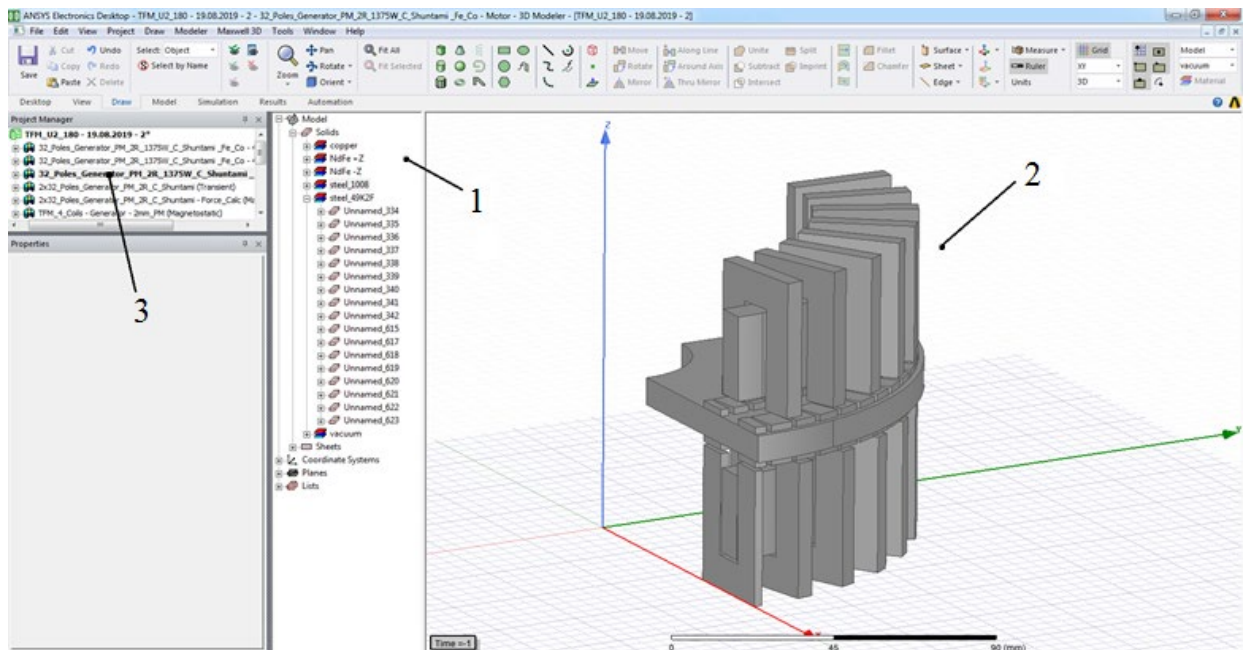


Рисунок 39. Головний екран програмного середовища ANSYS Maxwell під час підготовки моделі до розрахунку:

1 – поле для завдання властивостей матеріалів; 2 – поле для редагування власне моделі машини; 3 – поле для завдання особливостей розрахунку моделі.

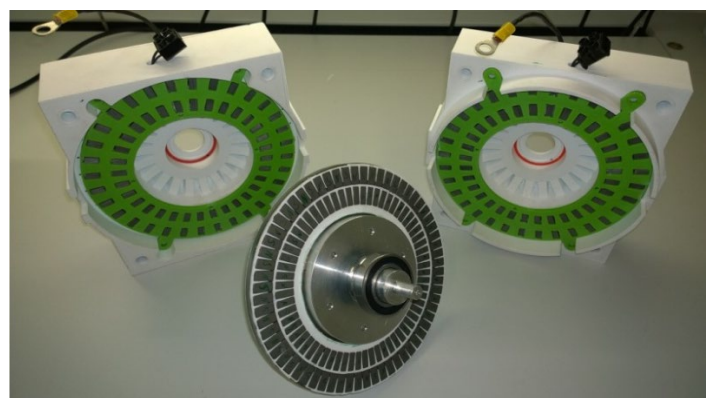
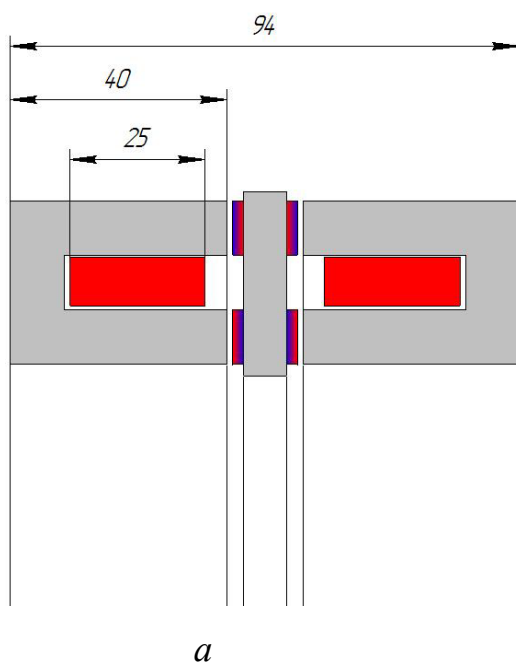


Рисунок 40. Експериментальний зразок ЕМПП, що досліджується:
а – геометричні розміри; б – загальний вид ЕМПП.

Розрахунок тривимірної моделі ЕМПП проведено у програмному комплексі ANSYS Maxwell [118] для двох варіантів: без магнітних шунтів та з ними (рис.41) [119, 120]. В усіх розрахунках використовувалися неодимові магніти Nd-Fe-B марки N35.

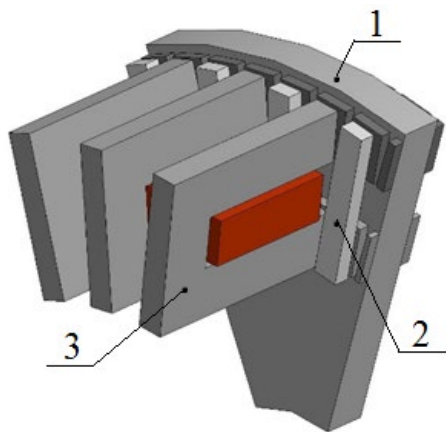


Рисунок 41. Конструкція ЕМПП із магнітними шунтами:

1 – диск ротора з ПМ; 2 – магнітні шунти; 3 – осердя статора з обмоткою.

В результаті аналізу першого варіанта, отримано графік наведеної котушки статора електрорушійної сили (ЕРС) у генераторному режимі, величина амплітудного значення якого складає 14 В (рис.8, крива2). Наступні розрахунки проведені при наявності магнітних шунтів, які розташовані у проміжку між П-подібними осердями. Їх ефективність визначена шляхом моделювання (рис.42, крива 1),

та доведена експериментально [121,122].

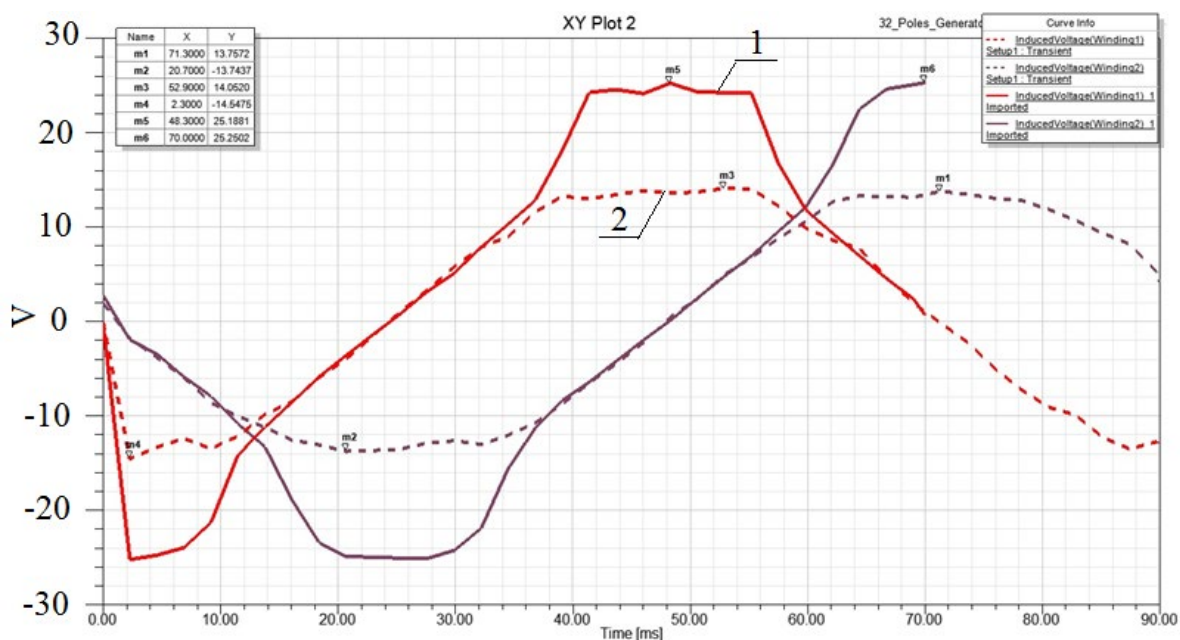


Рисунок 42. Наведена ЕРС досліджуваної ЕМПП:

1 – із магнітними шунтами; 2 – без магнітних шунтів.

Як видно із графіку, наведене амплітудне значення ЕРС, у конструкції із магнітними шунтами, збільшилось з 14 В до 24 В, що більше на 72%.

Для розрахунку моделі ЕМПД в режимі двигуна необхідно задати МРС обмотки статора, яка при кожному розрахунку змінюється для досягнення необхідного насичення матеріалів магнітної системи. В результаті комплексу розрахунків можна отримати залежність обертового моменту на валу від МРС (рис.43).

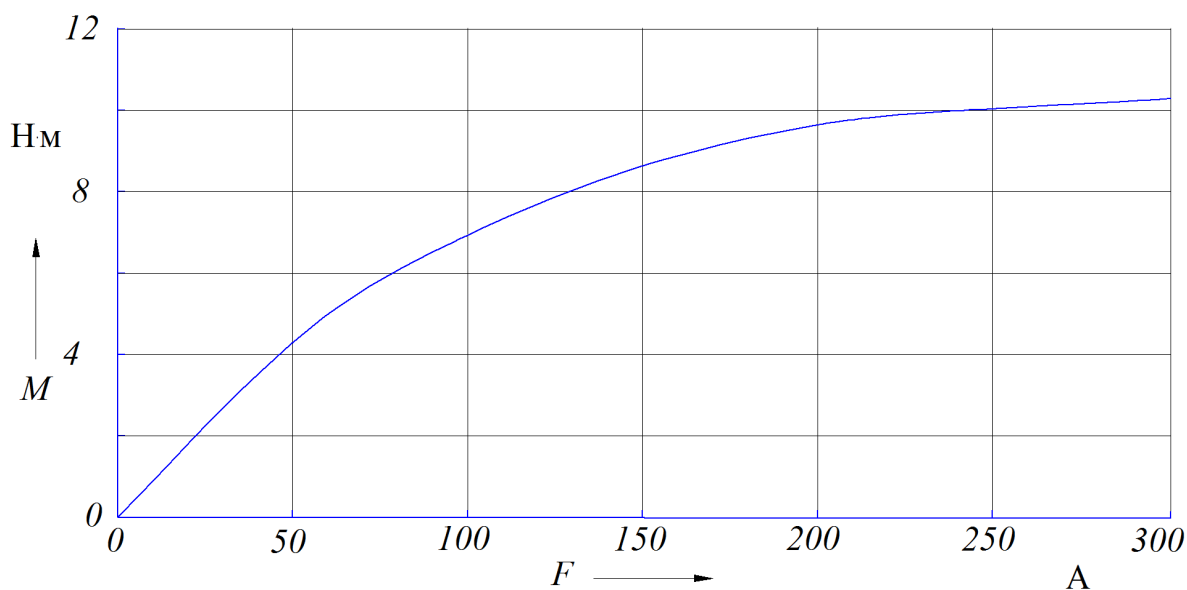


Рисунок 43. Залежність обертового моменту на валу ЕМПД від МРС

Як бачимо з рис. 43 існує певне значення МРС обмотки статора на рівні 250 А, вище якого зростання обертового моменту вже не буде істотним. Знаючи дане значення МРС, становиться можливим визначити кількість витків та струм обмотки статора, необхідний для створення максимального обертового моменту.

Наступним етапом дослідження є проведення експериментів, які для класу електричних машин з ПМ можливо проводити, як у режимі двигуна, так і у режимі генератора. Дослідження проводились для режиму двигуна по схемі, що представлено на рис.44. Живлення ЕМПД в режимі двигуна відбувається за рахунок ввімкнення реостату за схемою потенціометра в мережу із напругою 220 В та 50 Гц, а на двигун подається вже 110 В. Для зміщення фаз струмів обмоток статора використано конденсатор С1 ємністю 13,7 мкФ.

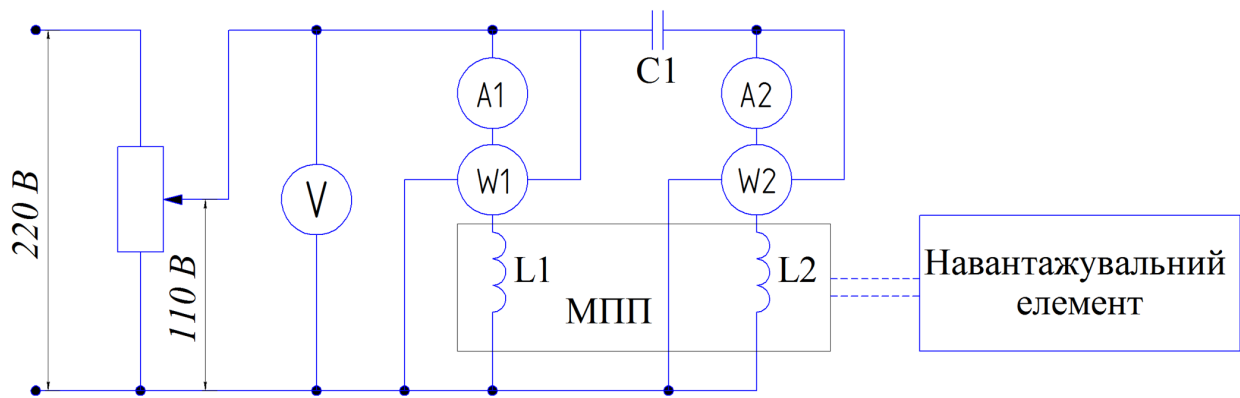


Рисунок 44. Принципова електрична схема випробувальної установки для дослідження ЕМПІ з дисковим ротором

Параметри обмотки ЕМПІ з дисковим ротором: активний опір 4,2 Ом; кількість витків 250; діаметр проводу без ізоляції 0,8 мм. Дослід проводився із постійною частотою обертання 95 об/хв. Результати експерименту представлено в табл.15 та побудовано робочі характеристики (рис.45).

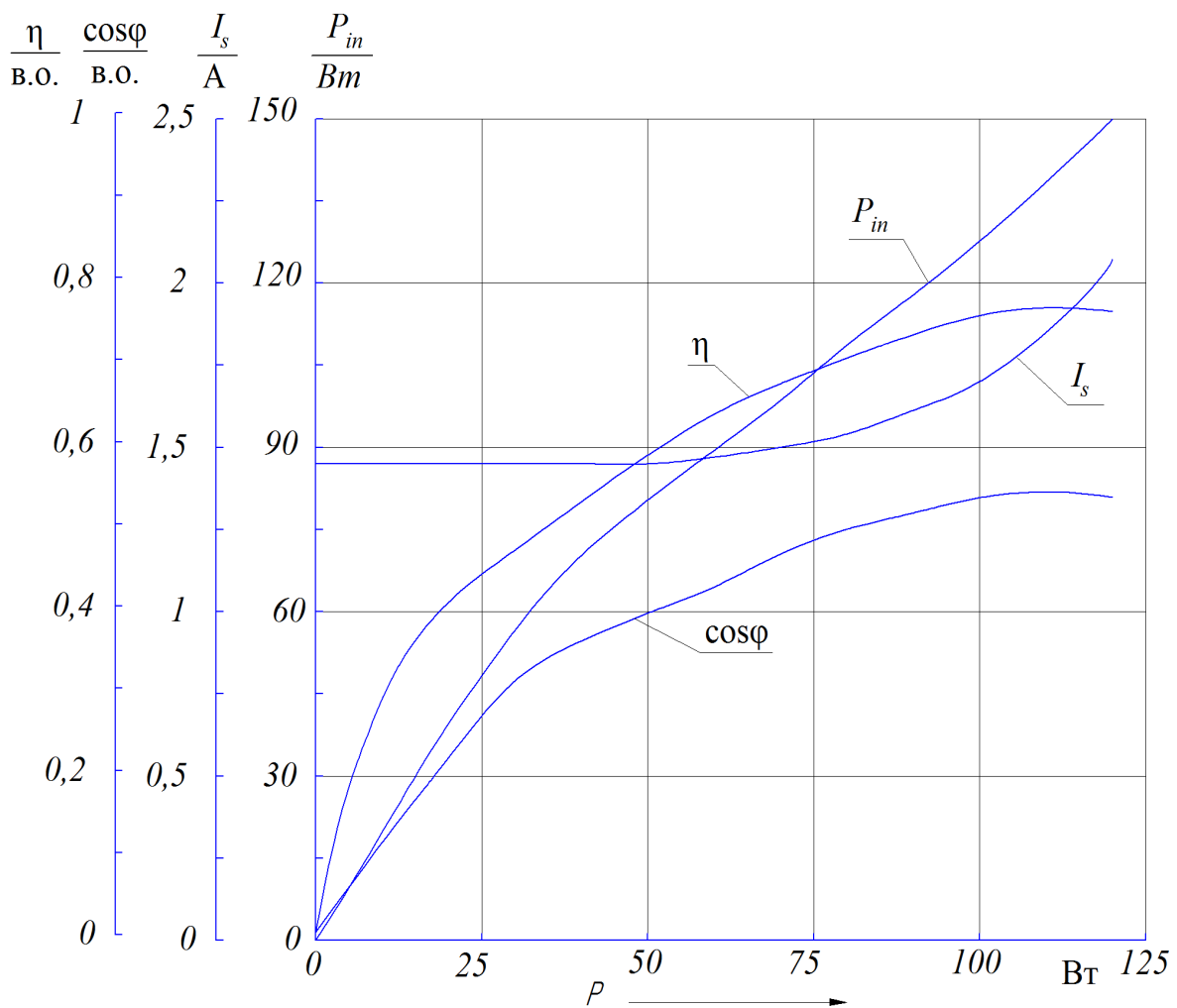


Рисунок 45.Робочі характеристики ЕМПІ режимі двигуна

Таблиця 15

Результати дослідження ЕМПП в режимі двигуна

$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$n, \text{об/хв}$	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
$U_1=U_m, \text{В}$	109	108,4	108,1	107,6	107,2	106,9	106,3	106,0	105,6	105,0	104,4
$U_2, \text{В}$	109	108,4	108,1	107,6	107,2	106,9	106,3	106,0	105,6	105,0	104,4
$I_1, \text{А}$	0,73	0,689	0,671	0,65	0,62	0,6	0,572	0,55	0,526	0,482	0,429
$I_2, \text{А}$	1,28	1,28	1,29	1,3	1,33	1,38	1,47	1,53	1,62	1,79	2,03
$I_s, \text{А}$	1,45	1,45	1,45	1,45	1,47	1,51	1,57	1,63	1,703	1,85	2,07
$P_1, \text{Вт}$	35,29	35,2	34,88	34,3	33,63	32,7	31,12	29,84	28,18	24,57	18,94
$P_2, \text{Вт}$	11,52	35,2	43,27	51,76	62,05	72,7	86,69	95,9	105,9	123,3	142,8
$P_{in}, \text{Вт}$	46,82	70,4	78,16	86,14	95,69	105,4	117,8	125,74	134,07	147,9	161,8
$\cos\varphi, \text{в.о.}$	0,2	0,31	0,35	0,37	0,42	0,46	0,49	0,51	0,526	0,53	0,52
$\eta, \text{в.о.}$	0,35	0,45	0,52	0,55	0,62	0,67	0,7	0,72	0,73	0,75	0,73
$S_1, \text{В}\cdot\text{А}$	80,6	74,7	72,59	70,0	67,2	64,53	60,86	58,45	55,58	50,69	44,87
$S_2, \text{В}\cdot\text{А}$	142,5	139,3	139,6	140,3	143,2	148,3	156,4	163,1	171,2	188,4	212,4
$S, \text{В}\cdot\text{А}$	231,5	223,5	222,5	221,7	223,7	228,6	237,3	244,9	254,6	275,95	307,1
$Q_1, \text{В}\cdot\text{Ар}$	72,46	65,91	63,66	61,01	58,17	55,62	52,31	50,25	47,91	44,34	40,68
$Q_2, \text{В}\cdot\text{Ар}$	142	134,7	132,7	130,4	129,05	129,2	130,19	131,88	134,6	142,463	157,27
$Q, \text{В}\cdot\text{Ар}$	226,7	212,2	208,3	204,5	202,2	202,9	206,05	210,23	216,48	232,96	261,01

U_1 та U_2 – напруги на обмотках;

I_1 та I_2 – струми в обмотках;

M – обертальний момент на валу;

n – частота обертання валу;

S, P_{in} та Q – повна, активна та реактивна потужності відповідно.

ЕМПП позиціонуються, як низькообертові високомоментні машини. Тому сфера використання цих машин досить широка, починаючи від прямого приводу коліс міського транспорту та інших транспортних засобів до приводу робототехніки, а також в якості тихохідних генераторів середньої та малої потужності. На даний момент серед існуючих машин та приводів з подібними параметрами можна виділити редукторні приводи на базі асинхронних або синхронних машин та мотор-колеса (рис. 46).



а



б

Рисунок 46. Приклади можливих сфер застосування:

а – мотор-колесо; *б* – редукторний привід на базі асинхронного двигуна

Хоч і на даний момент ці приводи більш розповсюджені, але ЕМПП має низку переваг: по-перше, ЕМПП має набагато простішу конструкцію в порівнянні з редукторним приводом та мотор-колесом, по-друге, потрібен додатково редуктор, який знижує ККД усього приводу на 10-15 % та надійність системи в цілому, а також потребує додаткового догляду та обслуговування. В свою чергу, мотор-колесо має досить складну обмотку, яка вимагає великої затрати часу на її виготовлення, а також статор мотор-колеса потребує штамповки листів із складною формою паза. Якщо розглядати ЕМПП, то можна сказати, що ця машина має найпростішу обмотку в порівнянні не тільки з її аналогами, але і з усіма електричними машинами (ротор з закріпленими на ньому магнітами та статор, що складається з двох частин, які представляють собою осердя простої форми та кільцеву обмотку).

Корпус машини не є частиною магнітного ланцюга, що дозволяє виготовити його навіть на 3D принтері із немагнітного матеріалу – пластику.

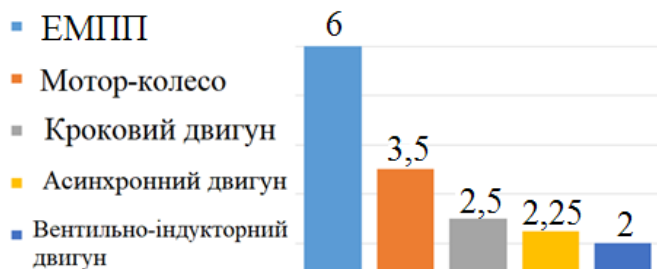


Рисунок 47. Питомі обертальні моменти електричних машин

Іншим аспектом є показники потужності машин, а саме питомий обертальний момент. На рис.47 представлена діаграма питомих моментів різних машин. Можна бачити, що ЕМПП перевищує своїх конкурентів у два-три рази. Тобто, при

однакових обертальних моментах, двигуни важать більшета займають додаткове місце у механізмі, яке може бути використано із користю для зменшення габаритів та ваги пристрою в цілому.

В таблицю 16 зведені параметри для порівняння ЕМПП та мотор-редукторів деяких виробників[123, 124].

Таблиця 16

Порівняння параметрів ЕМПП та редукторного електроприводу

Параметри	Одиниці вимірювання	ЕМПП	ООО «СИРИУС»	«Приводные технологии»		
				НН18-100/15К-100W/1500	5GU15К	5GU12,5
Вихідна потужність двигуна	Вт	104	100	100	120	140
Напруга	В	110	220	220	220	220
Частота обертання валу двигуна	об/хв	95	1400	1400	1300	1300
Струм	А	1,6	0,8	0,8	0,8	1,13
Маса	кг	6	5,7	6	4,8	4,8
Частота обертання валу редуктора	об/хв	–	93	100	100	100
Обертальний момент на вихідному валу редуктора	Н·м	9	8,8	9,1	10	10,6

Висота	мм	200	138	138	90	90
Ширина	мм	200	135	135	90	90
Довжина	мм	100	220	220	225	225
Корисний об'єм	$\times 10^{-3}, \text{ м}^3$	2,3	4,2	4,2	1,8	1,8

В таблиці 16 можна побачити, що ЕМПШ має більший діаметр ніж у сучасних мотор-редукторів, але меншу довжину. А в усіх інших параметрах ЕМПШ схожий на аналоги та не має суттєвих недоліків. Але для ЕМПШ не потрібен редуктор, що несумнівно є перевагою.

Також зауважимо, що досліджена машина має повітряний проміжок 1 мм, який може бути зменшений до 0,5 мм, що тим самим призведе до покращення ряду показників, зокрема, обертальний момент підвищиться на 35% та буде становити 12,2 Н·м (рис.48), що є максимальним показником серед даних у таблиці 16.

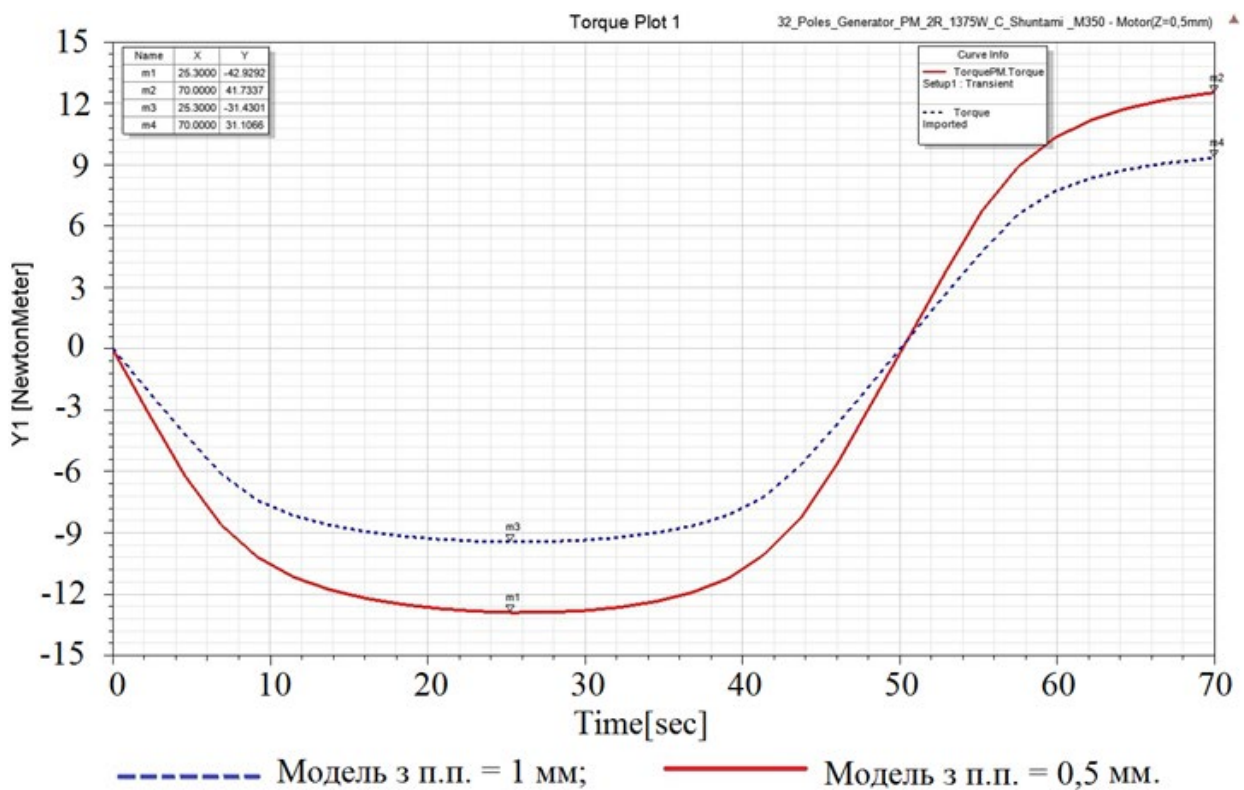


Рисунок 48. Графік моменту ЕМПШ з різними повітряними проміжками

В цілому, ЕМППце відносно молода електрична машина, що зарекомендувала себе як майбутній конкурент мотор-редукторамта машинам класичної конструкції, проте «класика» вже певною міра досліджена, а ЕМПП ще є куди розвиватися.

4.3 Оцінка енергоємності системи електрообладнання потокових ліній очищення зерна

Для оцінки можливостей енергозбереження на зернопунктах необхідно розробити найбільш об'єктивний спосіб оцінки ефективності технологій і технічних засобів. Техніко-економічне обґрунтування слід доповнити енергетичним аналізом технологій післязбиральної обробки зерна, машин і устаткування, який полягає у визначенні витрат різних видів енергії, а також сировини, матеріалів і живої праці при виробництві продуктів харчування [125]. Важливим показником процесу післязбиральної обробки зерна є її енергоємність, яка призначена для планування потреб галузі в паливно-енергетичних ресурсах. Енергоємність, яка включена в загальну систему показників післязбиральної обробки зерна, дозволить здійснити оцінку та вибір енергозберігаючих технологій, а також уточнити вимоги до енергетичного та технологічного обладнання післязбиральної обробки зерна [126].

Виробництво практично всіх видів сільськогосподарської продукції в нашій країні носить енергозатратний характер. В порівнянні з розвинутими закордонними країнами енергоємність виробництва сільськогосподарської продукції в Україні в 2...4 рази вища. Частка енергозатрат в собівартості продукції зростає. Тому необхідне вживання невідкладних заходів по зниженню енергоємності сільськогосподарської продукції за рахунок енергозберігаючих технологій і економії паливно-енергетичних ресурсів.

Визначення повної енергоємності сільськогосподарської продукції є першим кроком на шляху до енергетичного менеджменту і енергозбереження в АПК.