

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

А. В. Лоян, А. М. Хаустова, М. Ю. Тітов

КОНСТРУКЦІЯ СТАЦІОНАРНИХ ПЛАЗМОВИХ ДВИГУНІВ

Навчальний посібник до курсового і дипломного проектування

Харків «ХАІ» 2019

А. В. Лоян, А. М. Хаустова, М. Ю. Тітов

КОНСТРУКЦІЯ СТАЦІОНАРНИХ ПЛАЗМОВИХ ДВИГУНІВ

2019

УДК 621.455.32.03(075.8)
Л 81

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. В. М. Борщов,
канд. техн. наук, доц. Ю. О. Мітіков

Лоян, А. В.

Л 81 Конструкція стаціонарних плазмових двигунів [Електронний ресурс] : навч. посіб. до курс. і дипл. проект. / А. В. Лоян, А. М. Хаустова, М. Ю. Тітов. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2019. – 114 с.

Наведено метод розрахунку інтегральних параметрів стаціонарних плазмових двигунів і параметрів плазми. Описано спосіб аналізу магнітної системи двигуна, метод розрахунку й спосіб аналізу теплового стану двигуна.

Розглянуто принципи роботи вибору матеріалів і дано розрахунок міцності й надійності елементів рушійних установок плазмових прискорювачів.

Для студентів, які навчаються за спеціальністю «Авіаційна та ракетно-космічна техніка».

Іл. 104. Табл. 18. Бібліогр.: 23 назви

**УДК
621.455.32.03(075.8)**

© Лоян А. В., Хаустова А. М., Тітов М. Ю., 2019
© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2019

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО СПД	8
1.1 Історія створення двигуна.....	8
1.2 Принцип прискорення в СПД	11
1.3 Фізика процесу.....	12
1.4 Основні елементи прискорення плазми СПД	15
1.4.1 Розрядний струм у ЗІП.....	15
1.4.2 Взаємодія електронів з поверхнею РК.....	17
1.4.3 Розподіл потенціалу електричного поля уздовж силових ліній магнітного поля в розрядному проміжку	21
1.4.4 Розподіл потенціалу між плазмою і стінками РК.....	22
1.4.5 Взаємодія електронів з атомами РТ.....	25
1.4.6 Баланс зарядів на зрізі РК	26
1.4.7 Рух зарядів в області поблизу анода	27
1.4.8 Падіння потенціалу на катоді. Баланс напруги розрядного проміжку СПД	30
1.4.9 Інтегральні характеристики СПД	30
1.4.10 Результати розрахунку інтегральних характеристик СПД .	31
1.4.11 Висновки	34
2 РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕМЕНТІВ СПД.....	36
2.1 Магнітне поле СПД.....	36
2.1.1 Вплив зміни магнітної системи на розподіл магнітного поля у РК СПД	36
2.1.2 Аналіз впливу магнітного поля на властивості ЗІП.....	41
2.1.3 Вплив зміни магнітопроводу на розподіл магнітного поля у РК стаціонарного плазмового двигуна малої потужності.....	47
2.1.4 Вплив додаткових котушок і глибини магнітного анода	47
2.1.5 Зміна конфігурації центрального полюса.....	54
2.1.6 Збільшення густини струму і розміру зовнішньої додаткової котушки	64
2.1.7 Залежність МП від діаметра сердечника і осьового зазору в магнітному екрані	71
2.1.8 Залежність МП від установки магнітних кілець усередині РК.....	76

2.2 Розрахунок теплового стану двигуна	80
2.3 Аналіз конструкції СПД на стартові навантаження.....	833
2.4 Висновки	88
3 ПРИНЦИП ВИБОРУ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕМЕНТІВ СПД	89
4 РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ДВИГУНА	95
4.1 Розрахунок циліндричних анодів, навантажених тиском	95
5 РОЗРАХУНОК ФІЗИЧНОЇ НАДІЙНОСТІ	100
6 ПРИКЛАДИ ВИКОНАННЯ	103
6.1 Інтегральні характеристики двигуна.....	103
6.2 Характеристики двигунів різної потужності.....	106
6.3 Приклади застосування СПД.....	107
6.4 Висновки та подальший розвиток СПД	109
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	111

ВСТУП

Розвиток космічних і наземних плазмових технологій розширює область використання прискорювачів плазми і плазмових двигунів різних типів. Серед них – прискорювач Холла (двигун Холла), або стаціонарний плазмовий двигун (СПД), виділяється своєю надійністю, високою густиною іонного струму, високим коефіцієнтом корисної дії та широким діапазоном потужності. Зараз СПД використовується переважно в рухових установках для підтримки орбіти космічного апарата або як джерело плазми для модифікації поверхонь деталей. СПД також може бути використаний як джерело водневої плазми для досліджень в області ядерного синтезу, спрямованих на розроблення екологічно чистого виробництва дешевої електроенергії. Для модернізації цих технологій у подальшому необхідно покращувати інтегральні характеристики СПД – підвищувати ефективність використання плазмостворюючого газу, тягу, ККД, знижувати електронну частину розрядного струму і дивергенцію потоку плазми, що, в свою чергу, допомагає розвиватися плазмовим технологіями з використанням СПД.

СПД має більш просту технологічну конструкцію. Система електроживлення (СЕЖ) СПД простіша через меншу кількість модулів, що підключаються, порівняно з плазмовим імпульсним двигуном. СЕЖ СПД легша і менша за габаритами. Відомі роботи, присвячені питанню підключення СПД безпосередньо від фотоелектричних перетворювачів енергії [1], без використання складних бортових енергетичних систем. При достатніх термінах вогневого ресурсу двигуна СПД відрізняється більш низькою ціною тяги (витрати потужності на створення одиничної тяги), більш високою густиною тяги і має високе значення ефективної швидкості витікання при малих рівнях споживаної потужності. Поряд з цим багаторічний досвід штатного застосування СПД у космосі різними провідними космічними країнами (такими, як Росія і США) підтвердив високу надійність, результативність наземних та експлуатаційних випробувань, сумісність з іншими системами супутників. Технологія СПД має багато моделей різної потужності – від 0,9 до 30 кВт. Ця можливість дозволяє застосовувати СПД у широкому діапазоні космічних задач, на космічних апаратах (КА) різного призначення. Названі фактори є основними в умовах космосу.

З наведених вище фактів зрозуміло, що в задачах, де є вибір між плазмовим іонним двигуном і СПД, розробники електроракетних двигунів (ЕРД) віддають перевагу СПД.

До переліку країн лідерів аерокосмічної галузі з розроблення та виробництва СПД належать:

- Україна (Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "ХАІ", відділення електроракетних двигунів, моделі СПД-20МХ, а також двигуни потужністю від 0,65 до 1,5 кВт));

- Росія (дослідне конструкторське бюро ОКБ "Факел", моделі СПД-70, СПД-100, СПД-140, СПД-230);
- Франція (Snecma (франц. Société Nationale d'Étude et de Construction de Moteurs d'Avions), Laboratoire de Physique des Gaz, моделі PPS);
- США (розробки НАСА (англ. NASA) – Національне управління США з авіації і дослідження космічного простору, моделі big-Hallthrustor (BHT) і mini-Hallthrustor (MHT)).

Принципову схему СПД було створено більше 70 років тому і завдяки хорошим результатам експлуатаційних характеристик перших моделей (високий ККД, надійність і т. д.) двигун використовується уже десятки років. Першу лабораторну модель було розроблено в СРСР під керівництвом професора О. І. Морозова в Інституті Атомної енергії ім. І. В. Курчатова (ІАЕ).

Перші запуски супутників, оснащених СПД-60, були проведені в СРСР ще в 1971–1972 рр. Штатну експлуатацію СПД розпочато з 1982 року на борту геостационарного апарату "Потік", і досі СПД є єдиним типом ЕРД, що систематично застосовуються в космосі. За період від 1982 до 2005 рр. на орбіті успішно працювали 164 СПД. За даними ОКБ "Факел" на початок 2006 р. у складі космічних апаратів (КА) у космос виведено 240 СПД. СПД застосовуються провідними космічними державами: США – з 2006 р. ("TacSat-2"), Франція – з 2002 р. (КА "Stentor"), Європейське космічне агентство (КА "Smart-1"), супутники на платформах LS-1300 (SS/Loral), Eurostar-3000 (Astrium) і Spacebus-4000 CS (Alcatel) та багато інших.

За даними ОКБ "Факел" за останні роки основними замовниками СПД потужністю 650 Вт є BBC США, лабораторія AirForcePhilipsLaboratory, IPSTAR, TELSTAR _ MBSAT (SpaceSystems/Loral); STENTOR, ASTRA-1K _ INMARSAT (ALCATEL), INTELSAT-X ASTRIUM), EADS Astrium, ThalesAleniaSpace, котрим потрібні двигуни більше 1 кВт. Зараз за тенденцією збільшення кількості замовників і кількості фірм виробників СПД зрозуміло, що цей тип ЕРД має високу потребу на космічному світовому ринку.

Незважаючи на багаторічний успішний досвід використання СПД у космосі фізика процесів цього ЕРД повною мірою ще не вивчена, про що свідчить велика кількість дослідних робіт, присвячених даному питанню. Розробники суб'єкта підприємницької діяльності не мають можливості остаточно закінчити теорію фізичних процесів у розрядній камері (РК) двигуна. Причина – це відсутність суворої кореляції між емпіричними і теоретичними даними через велику сукупність різноманітних процесів, що протікають у РК СПД, і відсутність діагностичного апарату, який повною мірою може дати уявлення про процеси і їх взаємодію в плазмі двигуна.

Отже, розробники мають можливість складати рекомендації з виготовлення та удосконалення моделей СПД, ґрунтуючись виключно на власному досвіді.

Зростання кількості замовників СПД, збільшення заказів космічних апаратів з рушійною установкою на базі СПД, щорічне зростання кількості завдань показує те, що СПД є пріоритетним типом ЕРД для досліджень не тільки комерційних проектів, а також багатьох наукових завдань.

Підводячи підсумки аналізу стану розроблення СПД і сучасних вимог до даного типу ЕРД, виділяються три основні тенденції, що потребують розвитку. Розроблення нових двигунів, які відрізняються від існуючих:

- 1) вищим питомим імпульсом тяги 2000...3000 с;
- 2) широким робочим діапазоном потужності для КА малої маси – до 0,05...0,1 кВт і нижче, для важких КА – понад 30 кВт;
- 3) терміном активного існування понад 15 років.

1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО СПД

1.1 Історія створення двигуна

Історія плазмових двигунів почалася у 1950 році, коли випускника фізичного факультету Московського державного університету Олексія Івановича Морозова партком розподілив викладати механіку і електротехніку в технікумі заводського селища Людиново на південному сході Калузької області. Причина проста: батько О. І. Морозова був репресований і ніхто не брав до уваги ані його спеціалізацію (квантова теорія поля), ані неодноразові прохання його наукового керівника залишити молодого О. І. Морозова на кафедрі.

Викладачів фізики в ті роки досить часто просили виступати з лекціями про атомну енергію на заводах, і О. І. Морозов не став винятком. В один із днів 1953 року він повертався в Людиново з подібної лекції. «Незадовго до цього я прочитав книжку Гудмана про основи ядерної енергетики. Там була схема ядерної ракети – газ проходив крізь активну зону і розігрівався. Мене вразило, наскільки неефективна ця конструкція – з одного боку, атомна енергія, а з іншого – це ж просто теплова машина! – згадує Олексій Іванович. – І поки я йшов 12 км по шпалах до Людиново, я згадав експерименти з силою Ампера і котушкою Томсона, які я показував студентам в училищі, і мені прийшла в голову ідея – чому б не розганяти робоче тіло магнітним полем?».

У 1955 році О. І. Морозов захистив дисертацію, а в 1957 році його запросили на роботу в ІАЕ. До кінця 1950-х років успіхи СРСР у космосі надихнули конструкторів замахнутися на кілька великомасштабних космічних проектів. Планувався навіть політ до Марса.

2 липня 1959 року Лев Арцимович скликав співробітників на нараду. Темою обговорення була можливість побудови двигунів для марсіанського корабля. Арцимович запропонував для цієї системи такі характеристики:

- тяга – близько 10 кгс;
- швидкість витікання – 100 км/с;
- потужність двигуна – 10 МВт.

Співробітники ІАЕ запропонували кілька проектів:

- плазмовий імпульсний двигун (А. М. Андріанова);
- магнітно-плазмовий аналог сопла Лаваля (О. І. Морозова);
- двигун на основі однощільного джерела іонів, практично такого ж, який застосовувався для електромагнітного розділення ізоотопів (П. М. Морозова).

До речі, усі ці проекти в тому чи іншому вигляді пізніше були реалізовані.

1. Плазмово-ерозійний (варіант імпульсного) двигун А. М. Андріанова значно меншої потужності був встановлений на одному з супутників і виведений в космос у 1964 році.

2. Іонний малопотужний двигун П. М. Морозова під назвою «Зефір» стояв на тому ж самому супутнику «Метеор-10».

3. Експерименти з магнітним аналогом сопла Лавалю з центральним тілом (самі розробники називали його «коаксіал») проводилися з 1960 року, але схема виявилася складною, і побудований він був лише в 1980 році. Потужність цього монстра становила 10 ГВт.

Однак ці проекти не підходили для марсіанської програми з однієї простої причини: у конструкторів тоді не було джерел живлення підходящої потужності. Ця проблема актуальна і зараз: максимум, на який можна розраховувати, – це десятки кіловат.

Георгій Гродзовський одним з перших став конструювати малопотужні ЕРД у СРСР. Починаючи з 1959 року його іонні двигуни випробовувалися в космосі (правда, не на супутниках, а на балістичних ракетах).

У 1962 році О. І. Морозов запропонував свою конструкцію плазмового двигуна малої потужності, названого СПД. Принципово важливою особливістю СПД було те, що величина магнітного поля наростала до зрізу каналу двигуна – це забезпечувало створення в плазмі об'ємного електричного поля. Уся ідея двигуна була побудована саме на існуванні такого поля.

«Уперше на можливість існування об'ємних електричних полів у плазмі було вказано у 1910 році, однак протягом 50 років спроби створити таке поле були невдалі. У той час уважали, що, оскільки плазма є провідником, поле в ній створити не можна. Існує навіть формула Бома для провідності плазми. Правда, якщо слідувати їй, ані термоядра, ані СПД створити не можна!» – сміється О. І. Морозов.

«Але тоді мені ніхто не вірив. Коли я починав говорити про розподілені електричні поля, мене буквально виганяли з кімнати. Були й зовсім анекдотичні ситуації. У 1973 році я надіслав статтю, де були описані розподілені поля в СПД, у журнал “Фізика плазми”. Мені прийшло два абсолютно розгромних відзиви. В обох заявлялося, що я не знаю елементарних речей: створити електричне поле в плазмі неможливо. А на той час з моменту, як “Еол-1” злітав у космос і довів свою ефективність, уже пройшло більше року». Насправді створити об'ємне електричне поле в плазмі без магнітного поля дійсно не можна, оскільки за рахунок вільних електронів відбувається її екранування. Але коли в плазмі існує магнітне поле, яке впливає на рух електронів, об'ємні електричні поля в плазмі можуть існувати.

Група О. І. Морозова почала займатися СПД у 1962 році. Майже п'ять років двигун існував в лабораторному варіанті, у 1967 році у модель додатково було введено водяне охолодження. Пора було приступати до

льотно-космічних випробувань, але на цьому етапі розробники зіткнулися з несподіваною проблемою. Конструктори космічних апаратів категорично відмовлялися ставити на борт щось електричне.

«Один із заступників С. П. Королева М. В. Мельников сказав мені, що електрика і ракетна техніка несумісні. Адже як робоча речовина використовується кисень і достатньо однієї маленької іскорки, щоб усе злетіло в повітря» – згадує О. І. Морозов.

Директор ІАЕ А. П. Александров кілька разів зустрічався з конструкторами різних космічних апаратів, і йому вдалося домовитися з головним конструктором супутників серії «Метеор» установити СПД на КА.

У 1969 році директор ІАЕ А. П. Александров видав групі розробників технічне завдання, згідно з яким група повинна були зробити не сам двигун, а всю рушійну установку, включаючи систему зберігання і подачі ксенону та систему живлення.

При цьому треба було витримати дуже жорсткі рамки:

- 1) тяга – 2 гс (20 мН);
- 2) ККД – 30...40 %;
- 3) споживана потужність – 400 Вт;
- 4) маса – 15 кг;
- 5) ресурс – 100 годин.

Усе це потрібно було зробити за п'ять місяців. Група О. І. Морозова працювала буквально вдень і вночі, але з роботою впоралася. Виготовлення ж установки було доручено калінінградському заводу «Факел».

Через кілька днів після запуску «Метеора» почалися експерименти з двигунами. «Еол-1» був установлений на супутник таким чином, що вісь його тяги не проходила через центр мас апарата. При зупинці двигуна виникав певний крутний момент, який можна було компенсувати системою орієнтації, при цьому вона служила ще й вимірником тяги «Еола».

За експериментом уважно стежили не тільки конструктори двигуна, а й скептики, яких було немало. «Еол-1» мав пропрацювати всього кілька хвилин, потім автоматично вимкнутися, оскільки конструктори боялися, що струмінь плазми заблокує радіосигнал із Землі для зупинки двигуна. СПД відпрацював своє і зупинився. Після проведення радіоконтролю орбіти виявилось, що результати точно відповідають лабораторними даними. Правда, скептики не вгамувалися і висунули гіпотезу, що зміна орбіти була спричинена звичайним припиненням газового потоку через відкритий клапан. Але це припущення не підтвердилося після другого включення установки за командою із Землі. Двигун відпрацював ще 170 годин, піднявши орбіту «Метеор-10» на 15 км. «Факел» відмінно впорався зі своїм завданням, оскільки ресурс рушійної установки був перевищений майже вдвічі.

1.2 Принцип прискорення в СПД

Інша назва СПД – прискорювач із замкнутим дрейфом електронів і протяжною зоною прискорення (УЗДП).

Принципову схему СПД було створено більше 50 років тому і завдяки гарному поєднанню експлуатаційних характеристик перших моделей (високий ККД, висока надійність) СПД експлуатується уже десятки років [1]. Типову схему СПД зображено на рисунку 1.1.

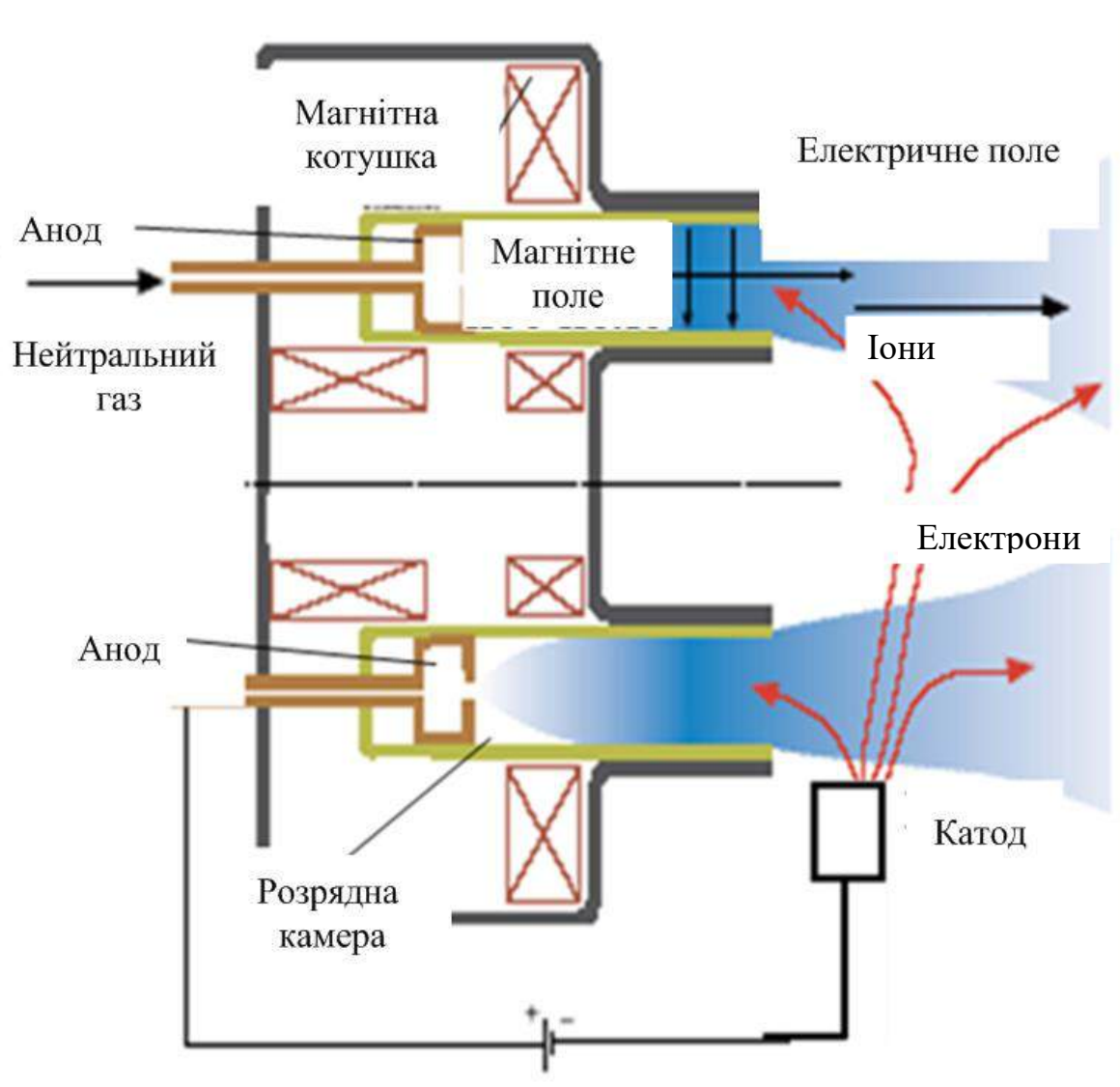


Рисунок 1.1 – Схема СПД

Основні процеси СПД такі: електрони, емітовані катодом-нейтралізатором (КН), рухаються до анода, дрейфуючи в схрещених поздовжньому електричному самоузгодженому і радіальному магнітному полях у розрядній камері й іонізують нейтральні атоми [2]. Іони, які народжуються в розрядній камері (РК), прискорюються поздовжнім

електричним полем і вилітають з розрядної камери. Об'ємний позитивний заряд іонного потоку нейтралізується електронами, емітованими катодом.

1.3 Фізика процесу

Електрони, емітовані КН, проходять область від КН до зрізу РК протяжністю l (рисунок 1.2) переважно за рахунок зіткнень, у тому числі з атомами робочого тіла (РТ). При кожному зіткненні електрони зміщуються до входу в РК на величину $h_u = 2 \cdot R_n$ (висота циклоїди) з імовірністю P_u , яка буде визначена, коли будуть математично описані всі основні процеси, що приводять до порушення азимутального дрейфу електронів. Для розрахунків прийнято $P_u = 0,6 \dots 0,7$.

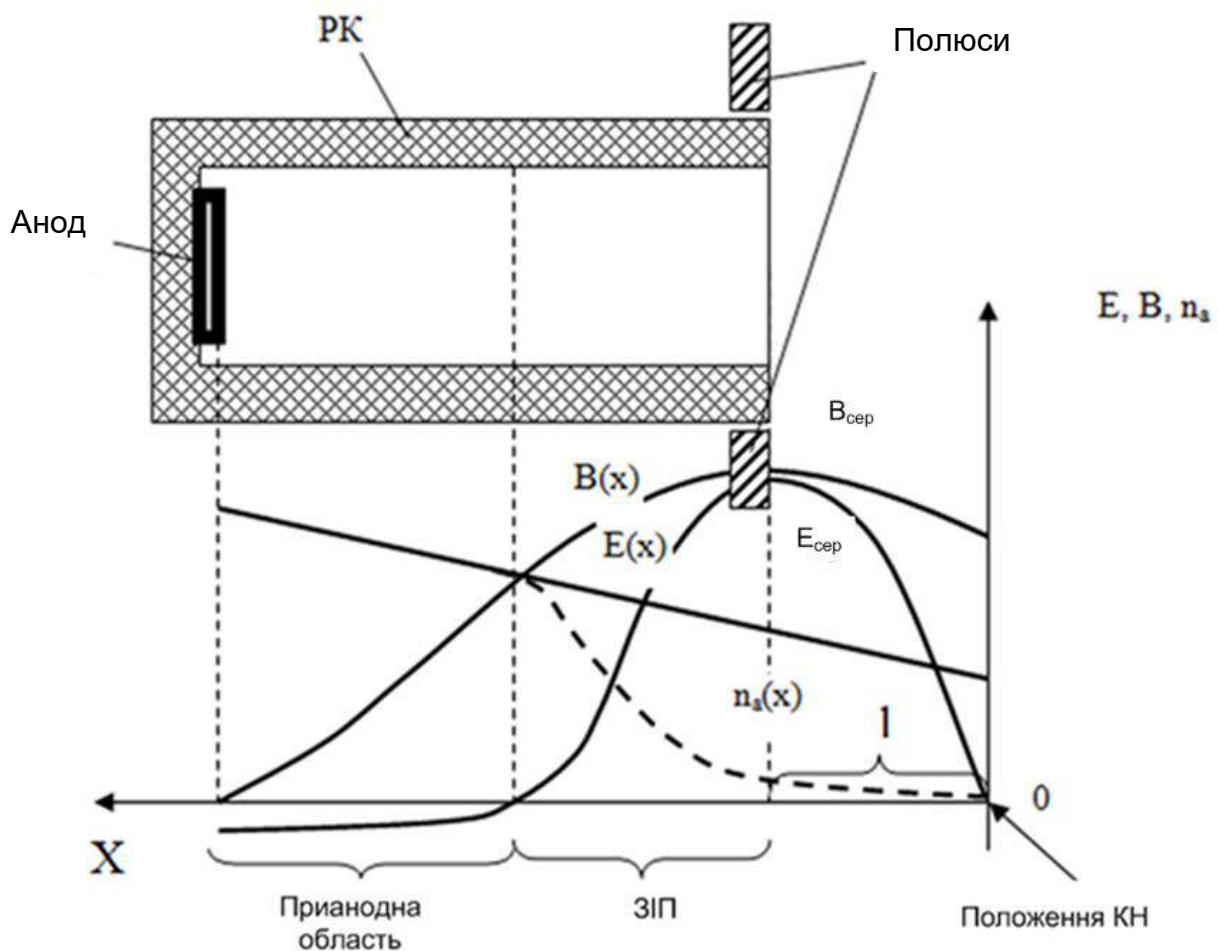


Рисунок 1.2 – Характерний розподіл електричного E та магнітного B полів, концентрації атомів n_a у разрядному проміжку

При цьому електрони набирають енергію від 0,5 до 2 еВ, яка відповідає енергії електронів, емітованих КН, що у першому наближенні дозволяє розглядати лише пружні зіткнення електронів з атомами з урахуванням приблизно десятикратного перевищення перерізу пружного розсіювання над перерізом іонізації. Позначимо мінімальну кількість

зіткнень N_{min} , яка необхідна для попадання електронів в РК. Ймовірність знаходження електрона, емітованого КН, у РК – $P = (P_{ц})^{N_{min}}$. Відповідно і частка P усіх електронів, емітованих КН, що досягли зрізу (входу) РК:

$$P = (P_{ц})^{N_{min}}. \quad (1.1)$$

Величина N_{min} визначається таким чином:

$$N_{min} = \int_0^l \frac{dx}{h_{ц}} = \int_0^l \frac{dx}{2 \cdot R_{л}} = \int_0^l \frac{dx}{2 \cdot \frac{m \cdot V_{др}(x)}{e \cdot B(x)}}. \quad (1.2)$$

Швидкість азимутального дрейфу $V_{др}(x)$ визначається кінетичною енергією, набраною електроном при проходженні різниці потенціалів $x/l \cdot U_{сер}$ на ділянці від КН до зрізу РК. З огляду на те, що електрон зміщується до входу в РК переважно за рахунок пружних зіткнень, визначаємо $V_{др}(x)$ як

$$V_{др}(x) = \sqrt{\frac{x \cdot U_{сер} \cdot 2 \cdot e}{l \cdot m}}. \quad (1.3)$$

На зрізі (вході) РК

$$V_{др.сер}(1) = \sqrt{U_{сер} \cdot 2 \cdot e/m}. \quad (1.4)$$

У першому наближенні в (1.2) множник $B(x)$ замінюється середньою на ділянці величиною $\approx 0.8 \cdot B_{сер}$, де $B_{сер}$ визначена на зрізі РК на середній лінії каналу. Тоді з (1.2)

$$N_{min} \approx \frac{1 \cdot 0,8 \cdot B_{сер} \cdot \sqrt{e}}{2 \cdot \sqrt{2 \cdot m \cdot U_{сер}}}. \quad (1.5)$$

На підставі рівняння (1.1), виділяючи серед усього потоку електронів, емітованих КН $I_p \setminus e$, саме той потік $I_{e0} \setminus e$ електронів, які досягли зрізу РК, визначимо співвідношення цих потоків у вигляді

$$I_{e0} = I_p (P_{ц})^{N_{min}}, \quad (1.6)$$

де I_p – сумарний електричний струм з КН, що дорівнює разрядному току.

При виведенні співвідношення (1.6) не були розглянуті умови, необхідні для того, щоб електрон міг зробити $N_{\min}$ зіткнень. Причина в тому, що до цього часу не розвинена теорія, на основі якої було б можливо пояснити перенесення електронів поперек магнітного поля зі швидкістю, яка визначається на основі результатів експериментальних вимірювань. Дослідження у цьому напрямку необхідні для того, щоб продовжити вивчення процесів у СПД з метою подальшого вдосконалення двигуна.

Концентрація атомів в області від КН до зрізу РК визначається через потік атомів з РК з концентрацією $n_{асер}$, і потік атомів з КН на зрізі РК з концентрацією $n_{кат}$. КН розташовується збоку від каналу СПД на відстані від 5 до 15 мм таким чином, щоб потік газу з КН мав радіальну складову руху відносно осі СПД.

Швидкість позовжнього (уздовж осі СПД) руху електрона $V_{ехсер}$ на вході в РК $V_{ехсер} = V_{дрсер} \cdot \sigma_{\Sigma} \cdot (n_{асер} + n_{кат}) \cdot 2 \cdot R_{лсер} \cdot P_{ц}$, де ларморівський радіус $R_{лсер} = V_{дрсер} \cdot m / (e \cdot B_{сер})$. Для знаходження $V_{ехсер}$ урахувані:

- 1) величина дрейфової швидкості $V_{дрсер}$ на вході в РК, яка визначається умовою (1.4);
 - 2) концентрація атомів $(n_{асер} + n_{кат})$;
 - 3) сумарний переріз розсіювання $\sigma_{\Sigma}(\epsilon_e)$, що містить переріз іонізації $\sigma_i(\epsilon_e)$ і переріз пружного розсіювання $\sigma_{пр}(\epsilon_e)$ (далі просто σ_i , σ_{Σ} і $\sigma_{пр}$).
- З урахуванням (1.4) маємо

$$V_{ехсер} = 4(n_{асер} + n_{кат})2(\sigma_i + \sigma_{пр})P_{ц}U_{сер}/B_{сер}. \quad (1.7)$$

Концентрація $n_{кат}$ визначається за таких умов:

- 1) КН знаходиться на відстані x_k від зрізу РК;
- 2) швидкість потоку атомів на виході з КН оцінюється величиною $V_{ак} \approx 200$ м/с;
- 3) масова витрата газу через КН – $\dot{m}_{кат}$ і маса атома – M .

Обсяг простору поблизу зрізу РК характеризується значним підвищенням концентрації атомів унаслідок потоку газу з КН. Його розміри становлять приблизно 1/4...1/6 від усього обсягу простору розрядного проміжку від КН до зрізу РК, в якому моделюються процеси. Тоді середня (уздовж азимута) концентрація $n_{кат}$ у потоці атомів через умовно виділену сферичну поверхню на зрізі РК на відстані x_k від КН

$$n_{кат} = (1/4 \dots 1/6) \cdot \frac{\dot{m}_{кат}}{V_{ак} \cdot 2 \cdot \pi \cdot x_k \cdot M}. \quad (1.8)$$

Концентрація $n_{асер}$ визначається з урахуванням втрати атомів унаслідок іонізації. Так як $\dot{m}_a / M / S$ – потік атомів через канал з площею поперечного перерізу S при масовій витраті $\dot{m}_a$ на ділянці поблизу анода, де іонізацією можна знехтувати, а $(I_p/e - I_{e0}/e)/S$ – потік іонів на зрізі РК, концентрація $n_{асер}$ визначається як

$$n_{асер} = \frac{\dot{m}_a / M - (I_p - I_{e0})/e}{V_{асер} \cdot S}, \quad (1.9)$$

де $V_{асер} \approx \cos(45^\circ) \cdot (k \cdot T_{рк} / 2M)^{1/2}$ – швидкість поздовжнього руху атомів на зрізі РК, яка розігріта до температури $T_{рк} \approx 300 \dots 900$ К при роботі СПД.

Величини σ_i і $\sigma_{пр}$ задавалися у вигляді залежностей від абсолютної швидкості електронів так:

$$\sigma_i(V_{др}) = \begin{cases} 0; & 0 \leq V_{др} \cdot 10^{-6} < 1,17; \\ -11,7 \cdot 10^{-20} + 10^{-25} \cdot V_{др}; & V_{др} \cdot 10^{-6} < 1,17; \\ 9,3 \cdot 10^{-20}; & 2,1 \leq V_{др} \cdot 10^{-6} < 3,6; \\ 12,8 \cdot 10^{-20} - 10^{-26} \cdot V_{др}; & 3,6 \leq V_{др} \cdot 10^{-6} < 8; \\ 38,4 \cdot 10^{-14} / V_{др}; & 8 \leq V_{др} \cdot 10^{-6}; \end{cases},$$

$$\sigma_{пр}(V_{др}) = \begin{cases} 400 \cdot 10^{-20} - 208,3 \cdot 10^{-26} \cdot V_{др}; & 0 \leq V_{др} \cdot 10^{-6} < 0,5; \\ 580 \cdot 10^{-20}; & 0,5 \leq V_{др} \cdot 10^{-6} < 1,0; \\ 350 \cdot 10^{-14} / V_{др}; & 1,0 \leq V_{др} \cdot 10^{-6}. \end{cases} \quad (1.10)$$

Наведена методика дозволяє проводити розрахунки потоків у СПД.

1.4 Основні елементи прискорення плазми СПД

1.4.1 Розрядний струм у ЗІП

Система координат розташована так, що на зрізі РК $x=0$, а на аноді $x=l$. Розрядний струм на анод I_p – це лавиноподібно збільшений у ЗІП струм електронів. На вході в РК струм електронів дорівнює I_{e0} , тоді розрядний струм на анод

$$\begin{aligned} I_p &= I_{e0} X, \\ X &= \exp\left(\int_0^1 \alpha(x) \cdot dx\right), \end{aligned} \quad (1.11)$$

де $\alpha(x)$ – кількість іонізаційних зіткнень на одиницю довжини пробігу електрона вздовж осі x ,

$$\begin{aligned} \alpha(x) &= n_a(x) \cdot \sigma_{\text{и}} \cdot \frac{V_{\text{др}}(x)}{V_{\text{ex}}(x)}, \\ V_{\text{др}}(x) &= \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot \varepsilon_e(x)}{m}}, \end{aligned} \quad (1.12)$$

де $V_{\text{др}}(x)$ – дрейфова швидкість електронів з енергією $\varepsilon_e(x)$ на віддалі x від входу в РК;

$V_{\text{ex}}(x)$ – швидкість позовжнього руху електрона завдяки розсіюванню з сумарною частотою ν_{Σ} , при якому електрон зміщується до анода на величину циклоїди $h_{\text{ц}} = 2 \cdot R_{\text{л}}$.

Частота ν_{Σ} містить частоту пружних і непружних зіткнень з нейтральними частинками. У першому наближенні зіткненнями із зарядженими частинками нехтуємо: $\nu_{\text{ч}} = V_{\text{др}}(x) \sigma_{\Sigma} n_a(x)$ і частотою $\nu_{\text{пов}}$ зіткнень з поверхнею РК, яка буде визначена далі. Таким чином $\nu_{\Sigma} = \nu_{\text{ч}} + \nu_{\text{пов}}$. Тоді швидкість позовжнього руху електрона $V_{\text{ex}}(x)$ буде визначена як

$$V_{\text{ex}}(x) = (\nu_{\text{ч}} \cdot P_{\text{ц}} + \nu_{\text{пов}}) \cdot 2 \cdot R_{\text{л}}, \quad (1.13)$$

а ларморівський радіус електрона $R_{\text{л}} = (V_{\text{др}}(x)m) / (eB(x))$.

Для визначення енергії $\varepsilon_e(x)$ електронів на віддалі x від входу в канал використано одновимірне рівняння зміни потоку енергії вздовж осі x

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{3}{2} \cdot T_e \cdot V_e \right) + n_e \cdot T_e \cdot \frac{\partial V_e}{\partial x} = -V_e \cdot \frac{\partial (n_e \cdot T_e)}{\partial x} + E_e \cdot n_e \cdot V_e - G,$$

де всі величини змінюються уздовж осі x :

T_e – температура електронів в одиницях eV ;

V_e – швидкість потоку електронів уздовж осі x ;

n_e – концентрація електронів;

E_e – напруга електричного поля;

G – величина зміни потоку енергії унаслідок витрат на непружні взаємодії з атомами газу.

З урахуванням раніше визначених величин потоків частинок енергія $\varepsilon_e(x)$, у свою чергу, визначається балансом

$$\begin{aligned} \varepsilon_e(x) = & E(x) \cdot \Delta x \cdot 3/5 - 3/5 \cdot \varphi_i \cdot 1.5 \cdot (\exp(\Delta x \cdot n_a(x) \cdot \langle \sigma_i \cdot V_{др}(x) \rangle) / V_{ex}(x)) - 1) + \\ & + \varepsilon_e(x - \Delta x) \cdot \frac{\exp(\int_0^{x-\Delta x} dy \cdot n_a(y - \Delta x) \cdot \langle \sigma_i \cdot V_{др}(y - \Delta x) \rangle) \cdot I_{e0}}{\exp(\int_0^x dy \cdot n_a(y) \cdot \langle \sigma_i \cdot V_{др}(y) \rangle) \cdot I_{e0}}, \end{aligned} \quad (1.14)$$

де $E(x) \cdot \Delta x \cdot 3/5$ – енергія, що набирається електронами при русі в електричному полі напругою $E(x)$ на ділянці від x до $x + \Delta x$;

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_e(x - \Delta x) \cdot \frac{\exp(\int_0^{x-\Delta x} dy \cdot n_a(y - \Delta x) \cdot \langle \sigma_{и} \cdot V_{др}(y - \Delta x) \rangle) \cdot I_{e0}}{\exp(\int_0^x dy \cdot n_a(y) \cdot \langle \sigma_{и} \cdot V_{др}(y) \rangle) \cdot I_{e0}},$$

ε_1 – енергія, принесена електронами з попередньої ділянки і розподілена між електронами на даній ділянці;

$$\varepsilon_2 = 3/5 \cdot \varphi_i \cdot 1.5 \cdot (\exp(\Delta x \cdot n_a(x) \cdot \langle \sigma_i \cdot V_{др}(x) \rangle) / V_{ex}(x)) - 1),$$

ε_2 – енергія, що витрачається на іонізацію і збудження (враховано коефіцієнтом 1,5) уздовж аналізованої ділянки з урахуванням збільшення кількості електронів унаслідок іонізації.

Концентрація $n_a(x)$ у довільному перерізі x знаходиться аналогічно (1.9):

$$n_a(x) = \frac{\dot{m}_a}{M \cdot V_a(x) \cdot S} - \frac{I_p - I_{e0} \cdot \exp(\int_0^x \alpha(x) \cdot dx)}{M \cdot V_a(x) \cdot S}, \quad (1.15)$$

де $V_a = x/l \cdot V_{анод} + V_{асер} \cdot (l-x)/l$;

$V_{анод} \approx \cos(45^\circ) \cdot (k \cdot T_{pk}/2/M)^{1/2}$ – швидкість руху атомів у аноді при температурі анода $T_a \approx 700 \dots 1000$ К.

1.4.2 Взаємодія електронів з поверхнею РК

Для опису закономірностей взаємодії електронів з поверхнею стінок РК аналізується рух електронів у пробковому магнітному полі на основі

теорії про збереження адіабатичного інваріанта (магнітного моменту руху електрона). При цьому враховується лише радіальна складова поля. Таке припущення ґрунтується на малості відносної зміни магнітного поля уздовж ларморовського радіуса електрона при $dB/dx \approx 1 \text{ мТл/м}$, $R_L \leq 10^{-3} \text{ м}$, $B \approx 0,02 \text{ Тл}$, $dB \cdot R_L / (B \cdot dx) \ll 1$. Розглядається умова відображення електрона, що рухається до поверхні РК у пробковому магнітному полі.

Уводяться позначення з індексом m для величин, узятих на серединній поверхні каналу, наприклад у точці 1 (рисунок 1.4).

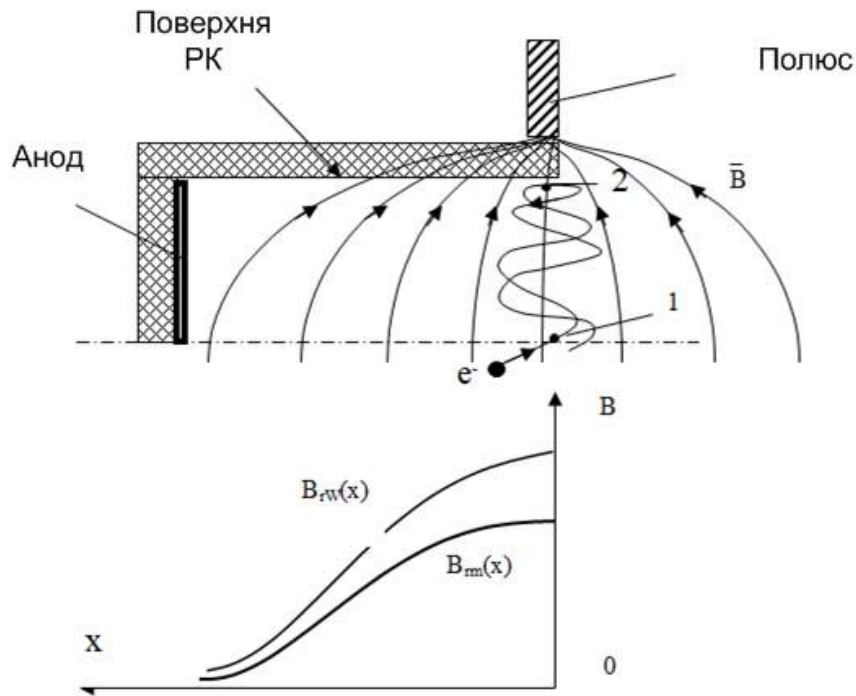


Рисунок 1.4 – Розподіл радіальної складової магнітного поля на серединній поверхні каналу $B_m(x)$, на стінці каналу $B_r(x)$ і характерна траєкторія руху електрона в пробковому магнітному полі поблизу полюса

При тіні електрона від пробкового поля поблизу поверхні каналу, наприклад у точці 2, маємо:

$$\varepsilon_w = \varepsilon_{\perp w} + \varepsilon_{\parallel w} = \varepsilon_{\perp w}, \quad (1.16)$$

оскільки $\varepsilon_{\parallel w} = 0$ – умова відображення електрона, тоді ε_m – повна кінетична енергія електрона. Точка 2 вважається точкою повернення електрона.

Величини ε_w , $\varepsilon_{\perp w}$, $\varepsilon_{\parallel w}$, $B_w = B_r$ з індексом w прийняті поблизу поверхні каналу РК, наприклад у точці 2.

З урахуванням закону збереження енергії в точці повернення $\varepsilon_m = \varepsilon_w = \varepsilon_{\perp w}$ з умови збереження адіабатичного інваріанта для рухомого в магнітному полі електрона $\varepsilon_{\perp}/B = m \cdot V_{\perp}^2 / 2B = \text{const}$ (при $\varepsilon_{\perp} = m \cdot V_{\perp}^2 / 2$) маємо $\varepsilon_{\perp m} / B_m = \varepsilon_{\perp w} / B_w$.

Умова відображення електрона визначається як $\varepsilon_{\perp m}/\varepsilon_m \geq B_m/B_W$. Тоді $1-\varepsilon_{\parallel m}/\varepsilon_m \geq B_m/B_W$ або

$$\frac{\varepsilon_{\parallel m}}{\varepsilon_m} \leq 1 - \frac{B_m}{B_w}, \quad (1.17)$$

де $\varepsilon_{\parallel m}$ слід розглядати як складову енергії електрона, що рухається в схрещених E і B полях;

$\varepsilon_{\parallel m}$ – кінетична енергія електрона, яка відповідає компонентам і швидкості, перпендикулярним напрямку магнітного поля;

$\varepsilon_{\perp}$, $\varepsilon_{\perp m}$ – кінетична енергія електрона, яка відповідає компонентам швидкості, паралельним напрямку магнітного поля;

$B_m = B_{rm}$ – радіальна складова магнітного поля.

Відношення $B_m/B_W \approx 1/(1,5...2)$ на зрізі РК і $B_m/B_W \approx 1/(1,2...1,5)$ у центральному перерізі РК характерні для типових конструкцій магнітної системи СПД, а $\varepsilon_{\parallel m}/\varepsilon_m \approx 1/3$ – для максвеллівського розподілу електронів за енергіями. Тоді, аналізуючи особливості руху електрона в перерізі поблизу зрізу РК і в центральному перерізі за допомогою виразу (1.17), слід зробити висновок про те, що:

– поблизу зрізу РК можна очікувати відображення електронів поблизу поверхні РК від пробкового магнітного поля, при цьому велика частка електронів не досягає поверхні РК;

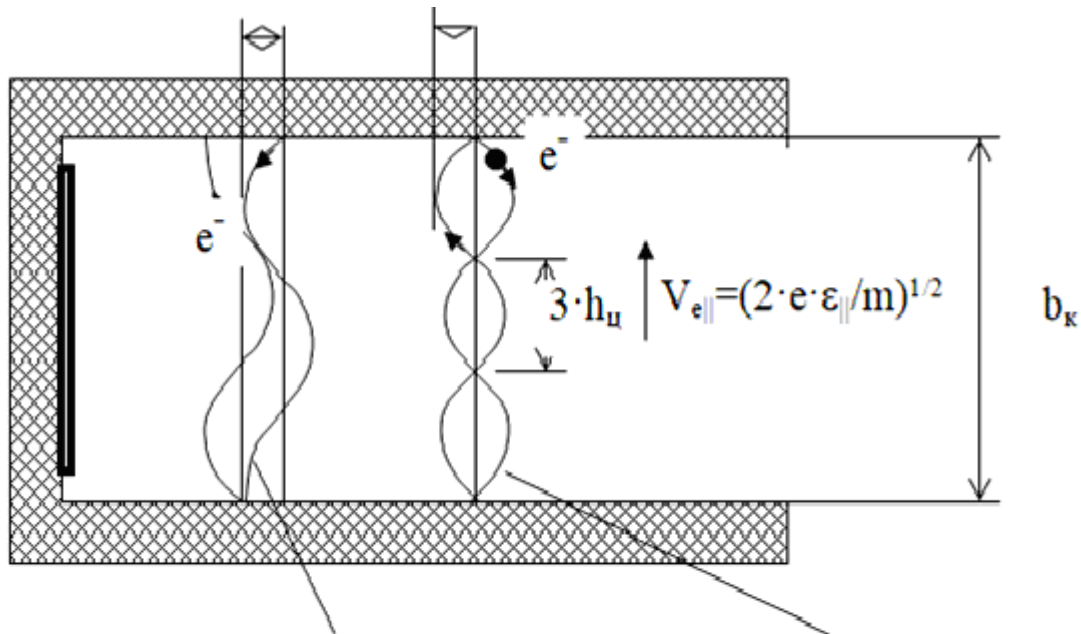
– у міру віддалення від зрізу РК до анода збільшується частка електронів, які долають магнітну пробку, досягають поверхні РК, а потім або відображаються від стінок РК при проходженні замикаючої пристінкової різниці потенціалів, або долають цей перепад потенціалу і не пружно взаємодіють з поверхнею РК.

Уважається, що в першому наближенні електрони розсіюються хаотично на поверхні РК. Таким чином, уздовж каналу, де не всі електрони відображаються магнітним полем, слід урахувати провідність електронів унаслідок розсіювання на стінках РК. На рисунку 1.5 показано механізм поздовжнього руху електронів, зумовлений зіткненнями зі стінками РК за умови, що електрони не відображаються магнітним полем.

Відношення $b_k/(3 \cdot h_{\perp})$, де $h_{\perp} = 2 \cdot R_{\perp} = 2 \cdot m \cdot V_{\perp}/(e \cdot B)$, а $V_{\perp}$ – швидкість електрона в напрямку, перпендикулярному вектору B , визначає можливе поздовжнє переміщення електрона при відображенні від поверхні РК. Якщо відношення $b_k/(3 \cdot h_{\perp})$ ціле, то результатом зміщення електрона нехтуємо. Найбільше зміщення на величину $h_{\perp}$ відбувається за умови $b_k/(3 \cdot h_{\perp}) = N + 0,5$, де N – ціле, при цьому поздовжня складова швидкості

$$V_{\text{ех позд}} = h_{\perp} v_{\text{пов}} = \frac{h_{\perp}}{\tau_{\text{сгв}}}, \quad (1.18)$$

де $V_{\text{пов}}$ – частота зіткнень електрона з поверхнею РК, а $\tau_{\text{СТW}} = b_k / (2 \cdot e \cdot \varepsilon_{\parallel} / m)^{1/2}$ – час руху електрона від стінки до стінки. Складова $\varepsilon_{\parallel}$ від сумарної енергії електрона ε визначається кінетичною енергією руху електрона поперек каналу і становить $\varepsilon_{\parallel} \approx \varepsilon \cdot 1/3$. Тоді маємо таке рівняння: $V_{\perp} = (2 \cdot e \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{\parallel}) / m)^{1/2} = (4 \cdot e \cdot \varepsilon / (3 \cdot m))^{1/2}$.



Рух електронів між стінками і повторне відображення електронів призводить до зміщення електрона в бік анода

Рух електронів між стінками і повторне відображення електронів не призводить до зміщення електрона в бік анода

Рисунок 1.5 – Механізм поздовжнього переміщення електронів, зумовлений зіткненнями з розрядною камерою

З урахуванням максвеллівського розподілу електронів за енергіями і виразу (1.18) середня величина $V_{\text{ex позд}}$

$$\langle V_{\text{ex позд}} \rangle = \frac{\int_0^{\infty} f_e(\varepsilon) \cdot V_{\text{ex позд}} \cdot d\varepsilon}{\int_0^{\infty} f_e(\varepsilon) \cdot d\varepsilon} = \frac{\int_0^{\infty} f_e(\varepsilon) \cdot \frac{4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2}}{3 \cdot B \cdot b_k} \cdot d\varepsilon}{\int_0^{\infty} f_e(\varepsilon) \cdot d\varepsilon}. \quad (1.19)$$

Далі розглянемо розподіл потенціалу електричного поля уздовж силових ліній магнітного поля в розрядному проміжку двигуна.

1.4.3 Розподіл потенціалу електричного поля уздовж силових ліній магнітного поля в розрядному проміжку

Щоб визначити закономірність розподілу концентрації електронів n_e і потенціалу електричного поля уздовж (у напрямку r), розглянемо силові лінії магнітного поля (рисунок 1.16).

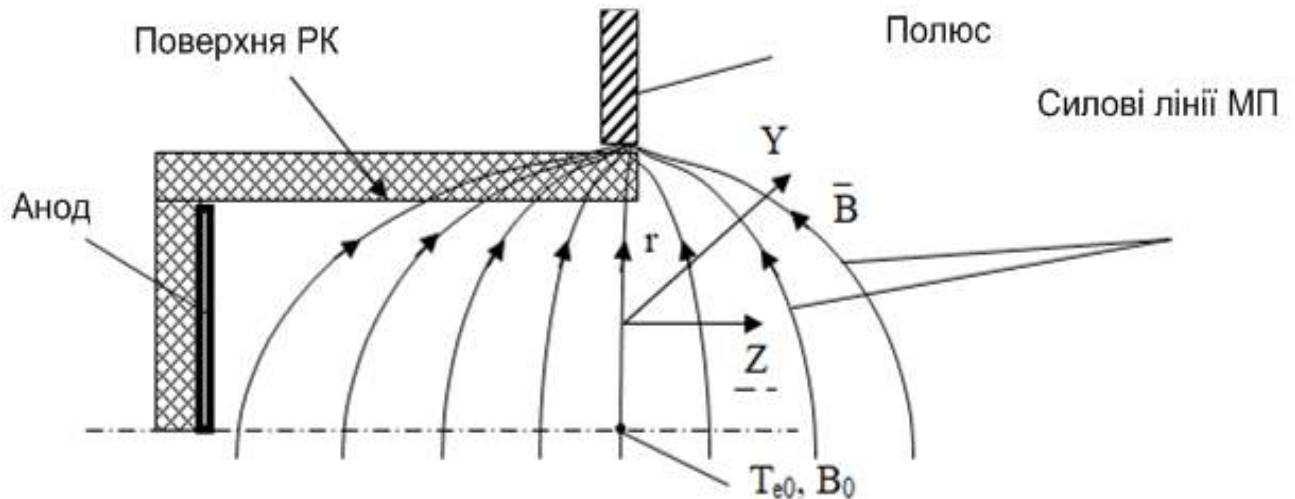


Рисунок 1.6 – Система координат, побудована уздовж силової лінії магнітного поля

Рівняння для градієнта перенесення імпульсу P через одиницю площі за одиницю часу dP/dr . dP/dr визначено з урахуванням

$$P = 2/3 \cdot n_e \cdot m \cdot \overline{V^2} / 2, \quad (1.20)$$

оскільки немає “перетікання” частинок, тоді $d(n_e \cdot V)/dr = 0$.

Похідна A описує гальмування електронів у потенційному електричному полі:

$$A = m \cdot \frac{d(\overline{V_r^2})}{dr \cdot 2} = \frac{d\phi}{dr},$$

$$(\overline{V_y^2} + \overline{V_z^2}) / B = \text{const},$$

де $\text{const} = T_{e0}/B_0/m$ – збереження адіабатичного інваріанта уздовж силової лінії магнітного поля, при цьому температура T_{e0} і магнітна індукція B_0 взяті на середній лінії розрядної камери (рисунок 1.6):

$$\begin{aligned}
\frac{dP}{dr} &= m \cdot \frac{d(n_e \cdot \overline{V^2})}{3 \cdot dr} = \\
&= m \cdot n_e \cdot \frac{d(\overline{V^2})}{3 \cdot dr \cdot 2} = \\
&= m \cdot n_e \cdot \frac{d(\overline{V_r^2} + \overline{V_y^2} + \overline{V_z^2})}{3 \cdot dr \cdot 2} = \\
&= n_e \cdot \frac{d\phi}{dr \cdot 3} - n_e \cdot \frac{dB}{dr \cdot 3} \cdot \frac{T_{e0}}{B_0}.
\end{aligned} \tag{1.21}$$

Ураховуючи, що $P = n_e \cdot T_e$, із (1.21), отримуємо співвідношення

$$3 \cdot d(n_e \cdot T_e) / n_e = d\phi - dB \cdot T_{e0} / B_0. \tag{1.22}$$

Необхідно зауважити таке. І електричний потенціал, і концентрація електронів суттєво змінюються уздовж силової лінії магнітного поля, а питання про зміну температури електронів уздовж силової лінії магнітного поля залишається відкритим, оскільки не всі найбільш важливі процеси, які ведуть до зміни імпульсу електронів, визначені кількісно. Тому використовувати диференціальне співвідношення (1.22) можливо, тільки вирішуючи комплексну задачу з урахуванням закономірностей переносу електронів поперек магнітного поля, руху потоків іонів у бік стінки і пристінкового розподілу електричного потенціалу.

1.4.4 Розподіл потенціалу між плазмою і стінками РК

Щоб визначити розподіл потенціалу між плазмою і стінками РК у так званому пристінковому шарі, необхідно:

1. Скласти рівняння балансу потоків заряджених частинок, іонів і електронів на поверхню РК з урахуванням емісійних властивостей поверхні, а саме – коефіцієнта вторинної емісії електронів $S(\varepsilon)$, який визначається енергією електрона ε , що падає на поверхню РК.

2. Задаючи температуру електронів T_e і потік іонів $V_{ir}(x, r=0) \cdot n_i(x, r=0)$ на вході в передшар (зі швидкістю $V_{ir}(x, r=0)$ і концентрацію $n_i(x, r=0)$), визначити пристінковий перепад потенціалу електричного поля (рисунок 1.7).

Уважається, що повна швидкість іонів на вході в передшар визначається:

- сумою $M \cdot V_{i0}^2 / 2$ теплової (хаотичної) складової повної енергії іона;

- складовою, що визначається потоком атомів, які перетворюються в іони уздовж РК;
- пройденою іоном різницею потенціалів $\Delta\phi(x)$ у поздовжньому напрямку, починаючи від перерізу $x=0$ на осі, де напруга електричного поля $E_x=0$, до перерізу x , там де іон входить у передшар;
- пройденою різницею потенціалів у радіальному напрямку, що визначається (1.22):

$$\int_{\sqrt{\frac{\Delta\phi_w \cdot q \cdot 2}{m}}}^{\infty} V_r \cdot \left[1 - S \left((V_x^2 + V_y^2 + V_r^2) \cdot m / 2 \right) \right] dV_r \int_{-\infty}^{\infty} dV_x \int_{-\infty}^{\infty} f(V_x, V_y, V_r, T_e) \cdot dV_y =$$

$$= V_{ir}(x, r=0) \cdot n_i(x, r=0), \quad (1.23)$$

де $f(V_x, V_y, V_r, T_e)$ – максвеллівська функція розподілу електронів за швидкостями.

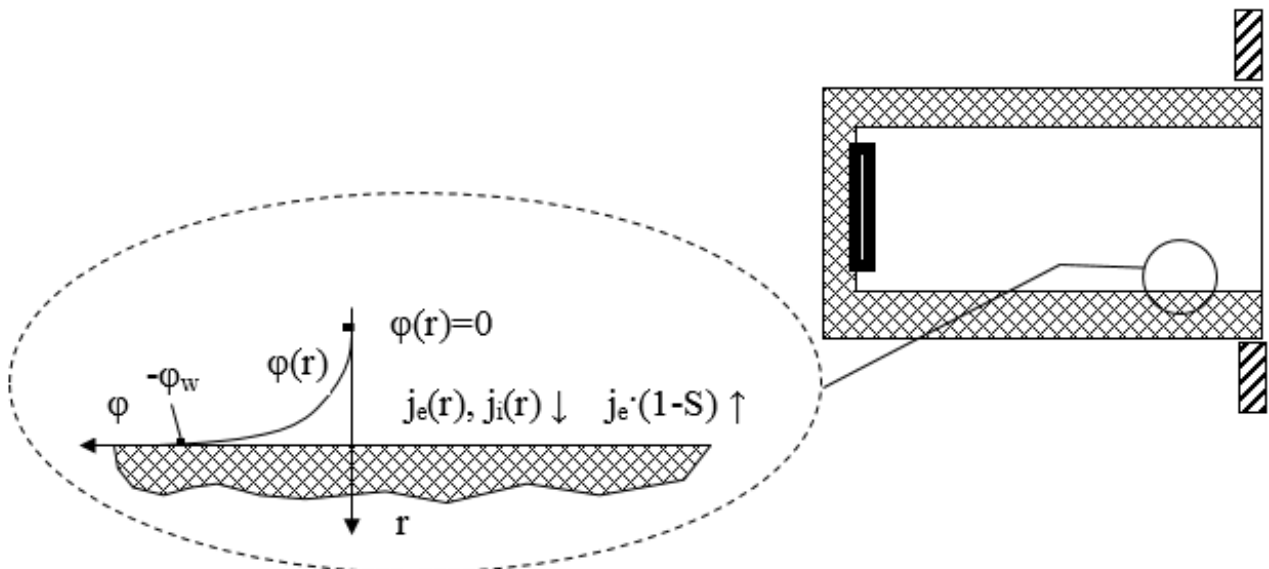


Рисунок 1.7 – Характерні розподіли потоку іонів $j_i(r)$ і електронів $j_e(r)$ (падаючих $\downarrow$ та емітованих $\uparrow$) на поверхню РК

Коефіцієнт вторинної емісії електронів $S(\varepsilon)$ визначається енергією електрона ε , що падає на поверхню РК:

$$S(\varepsilon) = S_{\max} \cdot \varepsilon / \varepsilon_{\max} \cdot e^{2 \cdot (1 - \sqrt{\varepsilon / \varepsilon_{\max}})}, \quad (1.24)$$

де $S_{\max} = 2,5$ для матеріала BN-SiO₂, $\varepsilon_{\max} = 500$ еВ.

Для визначення просторового розподілу потенціалу $\phi(r)$ у напрямку до поверхні РК розв'язується рівняння Пуассона

$$\frac{d^2\varphi(r)_w}{dr^2} = -\left(\frac{n_i(r) - n_e(r)}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}\right) \cdot q, \quad (1.25)$$

де $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

$\varepsilon = 1$, $n_e(r)$ і $n_i(r)$ – концентрації електронів та іонів в області, що моделюється;

q – одиничний заряд.

Апріорна оцінка протяжності передшару становить до 0,5 мм. Концентрація іонів $n_i(r=0)$ у перерізі x на вході в передшар визначається потоком іонів уздовж РК і швидкістю іонів, які розраховуються на попередньому етапі для області поблизу стінки РК протяжністю 1,5 мм, з якої іони можуть досягти передшару:

$$n_i(x) = \frac{j_i(x)}{\sqrt{(V_{i0}^2 + \Delta\varphi(x) \cdot q \cdot 2 / M)}}. \quad (1.26)$$

Концентрація електронів $n_e(r)$ визначається рівнянням Больцмана

$$n_e(r) = n_e(r=0) e^{\frac{-\Delta\varphi(r)_w}{T_e}}, \quad (1.27)$$

де $n_e(r=0) = n_i(r=0)$;

$\varphi(r)_w$ – перепад потенціалу на ділянці від межі плазми ($r=0$) до поточного перерізу r .

Похибка цього підходу визначається тим, що задається незмінність температури $T_e(r)$ електронів, що долають потенційний бар'єр $\Delta\varphi(r)_w$ на шляху руху до стінки, а також заміною рівняння руху електронів рівнянням Больцмана.

Отримане розв'язання рівняння Пуассона апроксимується функцією вигляду $\varphi(r)_w = r^f \cdot T_e^b \cdot c$, де розмірності для довжини – мм, потенціалу – В, температури – еВ.

Наприклад, для плазми, в якій іони прискорені різницею потенціалів у 150 В, а концентрація дорівнює $4 \cdot 10^{-17}$ м⁻³, ці коефіцієнти будуть дорівнювати $f = 7$, $b = -4,2$, $c = 8,23 \cdot 10^{12}$.

Результат розв'язання балансового рівняння потоку зарядів на стінку РК дає залежність пристінкового перепаду потенціалу від температури електронів $\Delta\varphi_w = f(T_e, V_{i0} = \text{const} \approx (1...2) \cdot 1000 \text{ м/с})$ (рисунок 1.8).

При цьому вважається, що при роботі СПД процеси не змінюються в часі. Це визначає баланс потоків зарядів на стінку РК і, як наслідок, певний температурі T_e відповідає певний перепад $\Delta\varphi_w$.

При збільшенні T_e понад 55...60 еВ очікується швидке зниження φ_w унаслідок посилення електрон-електронної емісії з поверхні РК.

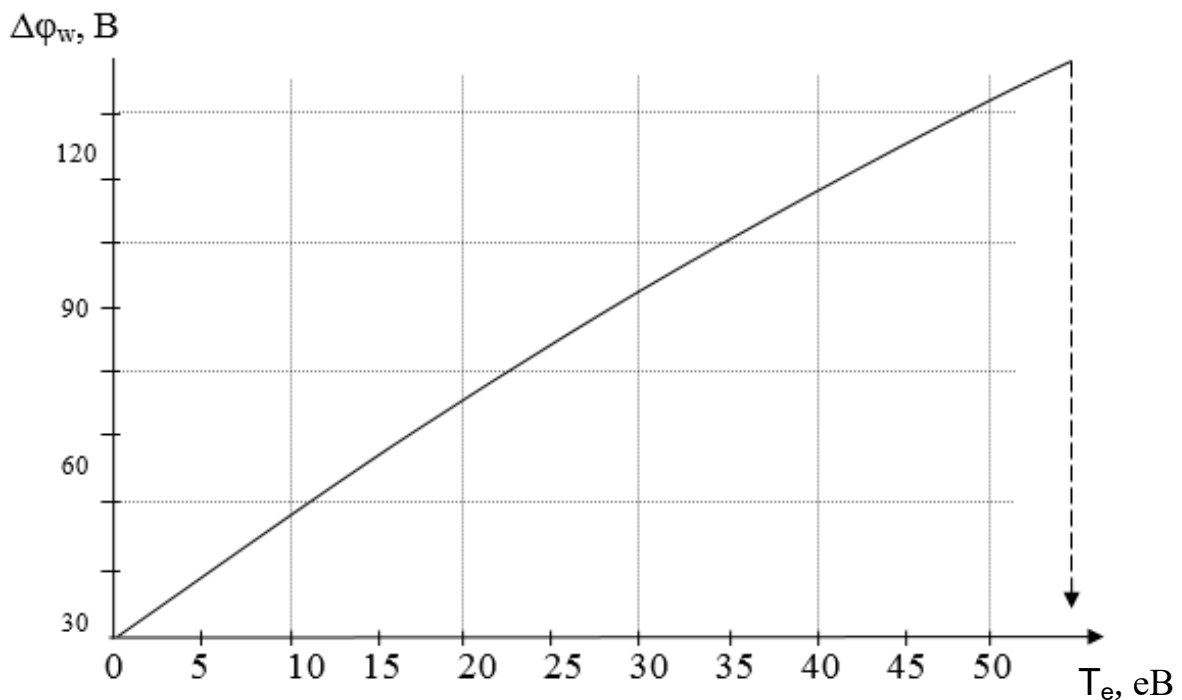


Рисунок 1.8 – Залежність величини пристінкового стрибка потенціалу $\Delta\phi_w$ від температури електронів T_e для матеріалу BN-SiO₂

Тепер необхідно розглянути процес взаємодії електронів з атомами РТ.

1.4.5 Взаємодія електронів з атомами РТ

При описанні механізму поздовжнього (уздовж РК) руху електронів унаслідок їх зіткнень з атомами РТ необхідно врахувати, що енергія в кожному перерізі ЗІП приноситься електронами в результаті їх проходження різниці потенціалів починаючи від КН. Тобто вважається, що енергія електронів ε у перерізі каналу значно перевищує величину кінетичної енергії, яка відповідає дрейфовій швидкості електронів – $m \cdot (E/V)^2 / e$. І як наслідок – траєкторія руху електронів значно відхиляється від циклоїдальних форм у тому випадку, коли абсолютна швидкість змінюється від 0 до максимуму. Тоді абсолютна швидкість руху електрона не має різко виражених максимуму і нульового значення, і в першому наближенні допустиме рівномірне зіткнення електронів з атомами РТ на різних ділянках траєкторії.

Будемо вважати, що вірогідність зміщення електрона до анода P_{cm} на величину h_c після зіткнення з атомом визначається тим, що зіткнення може відбутися або на ділянці траєкторії, наближеної до анода ($P_{cm}=1$),

або на ділянці, віддаленій від анода ($P_{cm}=0$). Таким чином, P_{cm} визначається відношенням різниці концентрацій атомів на ділянках траєкторії електронів, рознесених уздовж РК на величину $h_{ц}$, до середньої концентрації $P_{cm}=\Delta n_a/n_{cp}$, а величина зсуву дорівнює $P_{cm} \cdot h_{ц}$.

Частота зіткнень з атомами робочої речовини

$$v_{ч} = \langle \sqrt{2 \cdot \varepsilon \cdot e / m} \cdot \sigma_{\Sigma} \rangle \cdot n_a(x),$$

а відповідна поздовжня швидкість

$$V_{exam} = P_{cm} h_{ц} v_{ч} \Delta n_a(x) / n_{сер}.$$

З огляду на внесок зіткнень електронів з атомами і з поверхнею РК у формування поздовжнього потоку електронів з урахуванням $V_{exпозд}$ (див. вираз (1.18)) і величини $V_{exат}$, середня величина V_{ex} визначається так:

$$\begin{aligned} \langle V_{ex} \rangle &= \frac{\int_0^{\infty} f_e(\varepsilon \varepsilon \cdot (v_{пов} + v_{ч}) \cdot h_{ц} \cdot d\varepsilon}{\int_0^{\infty} f_e(\varepsilon \varepsilon \cdot d\varepsilon)} = \\ &= \frac{\int_0^{\infty} f_e(\varepsilon \varepsilon \cdot \left(\frac{\sqrt{2 \cdot e \cdot \varepsilon / 3m}}{b_k} + \Delta n_a \cdot \langle \sqrt{2 \cdot \varepsilon \cdot e / m} \cdot \sigma_{\Sigma} \rangle \right) \cdot \frac{4 \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot m / 3e}}{B} \cdot d\varepsilon}{\int_0^{\infty} f_e(\varepsilon \varepsilon \cdot d\varepsilon)}. \end{aligned} \quad (1.28)$$

Тепер необхідно розглянути баланс зарядів на зрізі РК СПД.

1.4.6 Баланс зарядів на зрізі РК

На зрізі РК концентрації електронів n_{e0} й іонів $n_{ісеп}$ однакові і визначаються через швидкість іонів $V_{ісеп}$ і частку іонного струму $I_{ісеп}$ на зрізі РК:

$$n_{ісеп} = \frac{I_{ісеп}}{V_{ісеп} \cdot e \cdot S} = \frac{I_{e0} \cdot (X-1)}{V_{ісеп} \cdot e \cdot S} = n_{e0} = \frac{I_{e0}}{V_{exсеп} \cdot e \cdot S}, \quad (1.29)$$

де швидкість іонів на виході з РК у першому наближенні може визначатися як $V_{ісеп} \approx (2 \cdot e \cdot U_{рк} / 2M)^{1/2}$, а поздовжня швидкість електронів $V_{exсеп}$ – за виразом

(1.28). З урахуванням прийнятого розподілу $E(x)$ – електричного поля в РК і величини $\alpha(x)$ (див. вираз (1.12)) швидкість

$$V_{\text{ісеп}} = \frac{\int_0^1 \sqrt{\int_0^x \frac{E(y) \cdot 2 \cdot e \cdot dy}{M}} \cdot \left\{ \exp\left(\int_0^{x+dx} \alpha(y) \cdot dy\right) - \exp\left(\int_0^x \alpha(y) \cdot dy\right) \right\} \cdot dx}{\int_0^1 \left\{ \exp\left(\int_0^{x+dx} \alpha(y) \cdot dy\right) - \exp\left(\int_0^x \alpha(y) \cdot dy\right) \right\} \cdot dx}. \quad (1.30)$$

Тепер розглянемо рух зарядів в області поблизу анода СПД.

1.4.7 Рух зарядів в області поблизу анода

При розгляді процесів у прианодній області (рисунок 1.9) прийнято такі позначення і допущення:

1) потоки, концентрації і швидкості електронів та іонів, концентрації атомів поблизу анода – $n_{ea} \cdot V_{ea}$, $n_{ia} \cdot V_{ia}$ і n_a , а також у перерізі $x = l_a$, де $d\varphi/dx = 0$ – $n_{e0} \cdot V_{e0}$, $n_{i0} \cdot V_{i0}$ и n_0 ;

2) унаслідок високої поздовжньої швидкості руху електронів у першому наближенні у цій області нехтуємо іонізацією атомів;

3) компенсація просторового заряду електронів, які переносяться на анод унаслідок дифузії, здійснюється переважно іонами, що утворилися поблизу перерізу $x = l_a$ і рухаються до анода під дією зворотного порівняно з ЗІП електричного поля. Електрони при русі до анода долають різницю потенціалів $\Delta\varphi$;

4) спеціально не розглядається утворення іонів поблизу $x = l_a$, при розрахунку припускається, що концентрація іонів відповідає концентрації електронів, що потрапили в переріз $x = l_a$, тобто $n_{i0} = n_{e0}$;

5) у першому наближенні допускається, що електрони відбиваються від пристінкового замикаючого перепаду потенціалу і не гинуть на стінках РК.

З умови незмінності потоку іонів

$$n_{ia} V_{ia} = n_{i0} V_{i0}, \quad (1.31)$$

де індексом a позначені величини поблизу анода, а індексом 0 – у перерізі $x = l_a$.

З огляду на те, що утворені іони мають швидкість, яка визначається тепловою енергією $\varepsilon_{\text{тепл}}$ атомів, а поблизу анода іони мають швидкість, яка

визначається величиною $\Delta\varphi$, тобто різницею потенціалів між анодом і плазмою у перерізі $x = l_a$, і враховуючи, що $\Delta\varphi \gg \varepsilon_{\text{тепл}}$, можна записати

$$\frac{V_{i0}}{V_{ia}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{тепл}}}{\Delta\varphi}}. \quad (1.32)$$

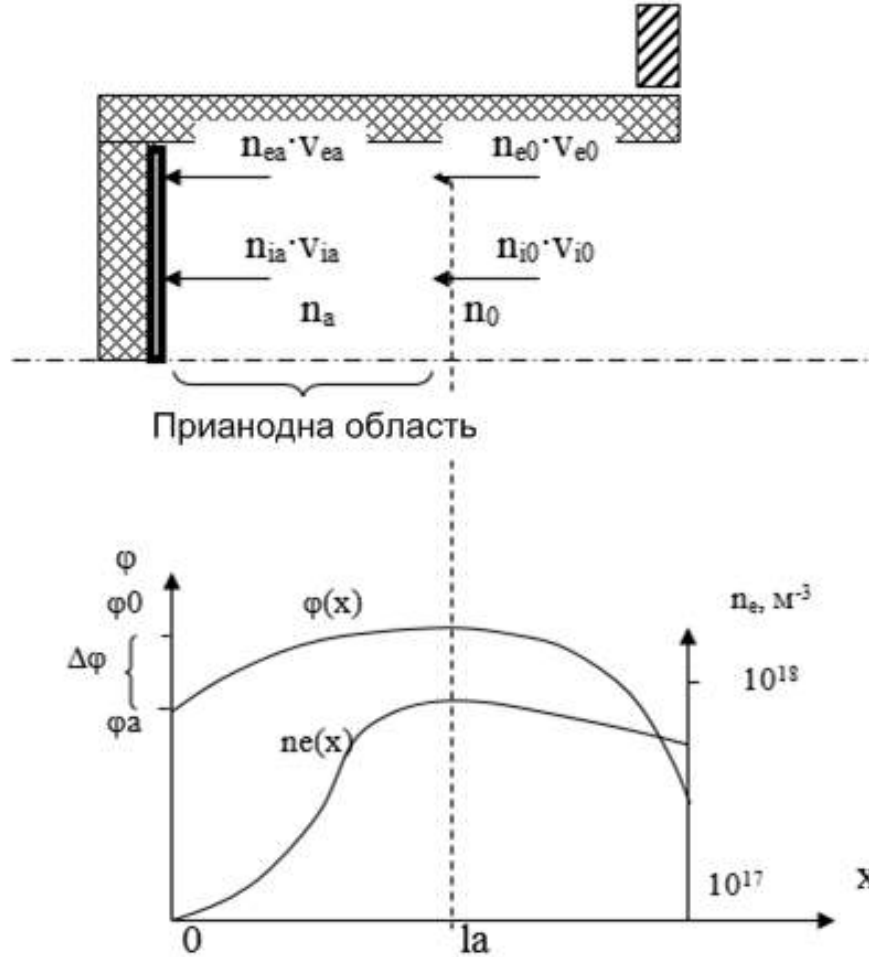


Рисунок 1.9 – Потoki зарядів і характерний розподіл потенціала $\varphi(x)$ у прианодній області протяжністю l_a , де у перерізі $x = l_a$ $d\varphi/dx = 0$

З умови незмінності потоку електронів у цій області аналогічно (1.30) визначаємо

$$n_{ea} V_{ea} = n_{e0} V_{e0}. \quad (1.33)$$

Ураховуючи (1.30) – (1.32), знаходимо

$$\frac{V_{ea}}{V_{e0}} = \frac{n_{e0}}{n_{ea}} = \frac{n_{i0}}{n_{ia}} = \sqrt{\frac{\Delta\varphi}{\varepsilon_{\text{тепл}}}}. \quad (1.34)$$

Поздовжні швидкості руху електронів V_{e0} і V_{ea} у перерізі $x = l_a$ визначають так:

$$V_{e0} = \frac{j_{e0}}{n_{e0}} = D_{e0} \cdot \frac{dn_{e0}}{dx} \cdot \frac{1}{n_{e0}}, \quad (1.35)$$

де j_{e0} – дифузний потік електронів у поздовжньому напрямку внаслідок розсіювання електронів на стінках РК. Коефіцієнт дифузії буде дорівнювати $D_{e0} \sim l_{\text{пробігу}} \cdot V_{\text{хаот}} \sim 2R_{\text{л0}} \cdot 2R_{\text{л0}} / \tau_{\text{ст0}}$.

Довжина пробігу електрона між зіткненнями з урахуванням ларморівського радіуса електрона буде $l_{\text{пробігу}} = h_c = 2R_{\text{л0}} = 2 \cdot V_{\text{др0}} \cdot m / (e \cdot B_0)$. $V_{\text{хаот}} = 2R_{\text{л0}} / \tau_{\text{ст0}}$ – швидкість хаотичного руху електрона між зіткненнями, де $\tau_{\text{ст0}}$ – час між зіткненнями електрона з атомами визначається довжиною вільного пробігу електрона $1/(n_a \cdot \delta_\Sigma)$ і швидкістю $V_{\text{др0}}$ як $\tau_{\text{ст0}} \sim 1 / (n_a \cdot \delta_\Sigma \cdot V_{\text{др0}})$.

У першому наближенні $dx \approx l_a$, аналізуючи характерний розподіл концентрації електронів у області $dn_{e0}/n_{e0} \approx 1/2 \dots 1$ (рисунок 1.9) і враховуючи (1.35), маємо

$$V_{e0} = \frac{V_{\text{др0}}^3}{e} \cdot \left(\frac{m}{e \cdot B_0} \right)^2 \cdot \frac{n_0 \cdot \sigma_\Sigma}{2 \cdot l_a} \quad (1.36)$$

$$\text{при } V_{\text{др0}} \approx \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{др0}}}{3} \cdot \frac{2 \cdot e}{m}},$$

де $\varepsilon_{\text{др0}}$ – енергія електрона в перерізі $x \approx l_a$.

Аналогічно (1.36) визначається поздовжня швидкість електронів поблизу анода при $n_a \approx n_0$ і $\sigma_\Sigma \approx \text{const}$ між перерізами $x \approx l_a$ і $x = 0$ (див. рисунок 1.9):

$$V_{ea} = \frac{V_{\text{дра}}^3}{e} \cdot \left(\frac{m}{e \cdot B_a} \right)^2 \cdot \frac{n_0 \cdot \sigma_\Sigma}{2 \cdot l_a}. \quad (1.37)$$

З огляду на те, що енергія електронів при їх наближенні до анода зменшується на величину $\Delta\varphi$, швидкість дрейфу електронів у шарі біля анода

$$V_{\text{дра}} = \left(V_{\text{др0}}^2 - \frac{\Delta\varphi \cdot 2 \cdot e}{m} \right)^{1/2}. \quad (1.38)$$

Ураховуючи (1.38) і (1.34), маємо

$$\frac{\left(V_{др0}^2 - \frac{\Delta\varphi \cdot 2 \cdot e}{m}\right)^{3/2}}{V_{др0}^3} \cdot \left(\frac{B_0}{B_a}\right)^2 = \sqrt{\frac{\Delta\varphi}{\varepsilon_{тепл}}}. \quad (1.39)$$

Якщо величини $V_{др0}$, B_0 і B_a у перерізі, де $x = l_a$, і поблизу анода відомі, тоді з (1.39) можна знайти перепад потенціалу $\Delta\varphi$ у прианодній області. Величина $V_{др0}$ – дрейфова швидкість електрона була визначена раніше в області ЗІП, де $E > 0$ [3–5].

1.4.8 Падіння потенціалу на катоді. Баланс напруги розрядного проміжку СПД

Процеси в КН окремо від процесів у СПД не розглядаються. Для визначення перепаду потенціалу на КН використовується типова залежність напруги від струму розряду. Наприклад, для КН, спроектованого для роботи на струмі 4 А, маємо

$$U_{pk} = 20 + (I_p - 4)^2. \quad (1.40)$$

Баланс напруг в розрядному проміжку без урахування падіння напруги на магнітних котушках

$$U_p = U_k + U_{сеп} + U_{pk} - \Delta\varphi, \quad (1.41)$$

де окремі складові рівняння (1.41) були визначені вище.

1.4.9 Інтегральні характеристики СПД

Запишемо основні рівняння для визначення інтегральних характеристик СПД.

Рівняння тяги

$$F_T = \int_0^1 \left(\sqrt{\int_0^x (E(y) \cdot dy + U_{ср}) \cdot \frac{2 \cdot e}{M}} \right) \cdot \left\{ \exp\left(\int_0^{x+dx} \alpha(y) \cdot dy\right) - \exp\left(\int_0^x \alpha(y) \cdot dy\right) \right\} \frac{I_{e0}}{e} dx / l. \quad (1.42)$$

Питомий імпульс

$$I_{sp} = \frac{F_T}{\dot{m}_k + \dot{m}_a} . \quad (1.43)$$

Тяговий ККД

$$\eta_T = \frac{F_T^2}{2 \cdot U_p \cdot I_p \cdot (\dot{m}_k + \dot{m}_a)} . \quad (1.44)$$

З наведеного моделювання можливо визначити падіння потенціалу на катоді, баланс напруги розрядного проміжку СПД та інтегральні характеристики СПД.

1.4.10 Результати розрахунку інтегральних характеристик СПД

Як тестова задача були розраховані інтегральні характеристики СПД (рисунки 1.10 і 1.11) типорозміру М-70 при таких номінальних параметрах:

- масова витрата через катод-нейтралізатор – 0,3 мг/с;
- масова витрата через анод-газорозподільник – 1,5 мг/с;
- КН розташований на відстані 7 мм від зрізу розрядної камери;
- магнітні котушки підключені в ланцюг основного розряду.

Для оцінювання точності результатів моделювання на рисунках 1.10 і 1.11 показано експериментальні залежності для СПД типу СПД М-70.

Слід зауважити, що задовільну точність результатів розрахунків було досягнуто за умови, що КН розташовувався на відстані 5...12 мм від входу в РК. Відхилення розрахункових і експериментальних залежностей розрядного струму (рисунок 1.10) слід розглядати як результат неповного визначення складових механізму провідності електронів на ділянці від КН до входу в РК.

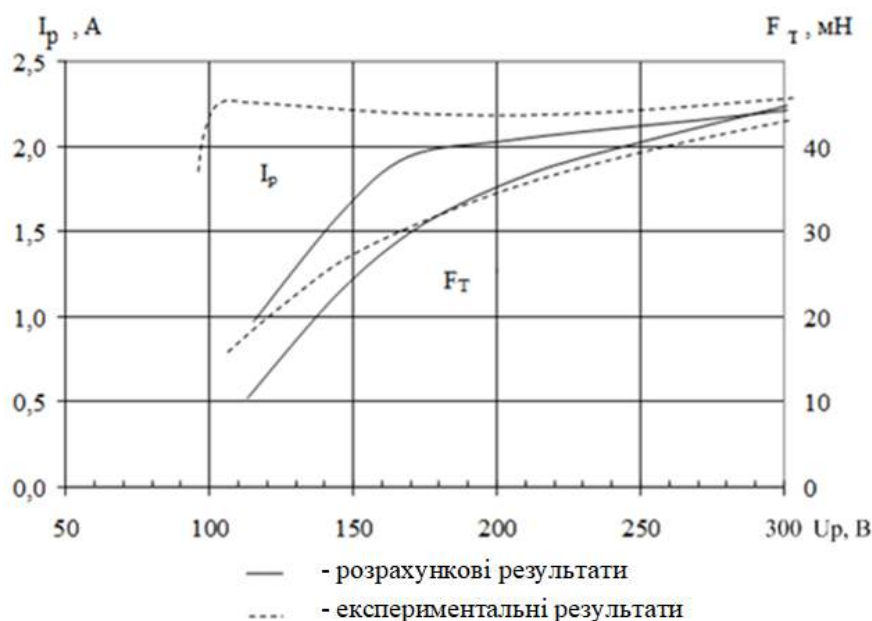


Рисунок 1.10 – ВАХ і залежність тяги СПД від розрядної напруги

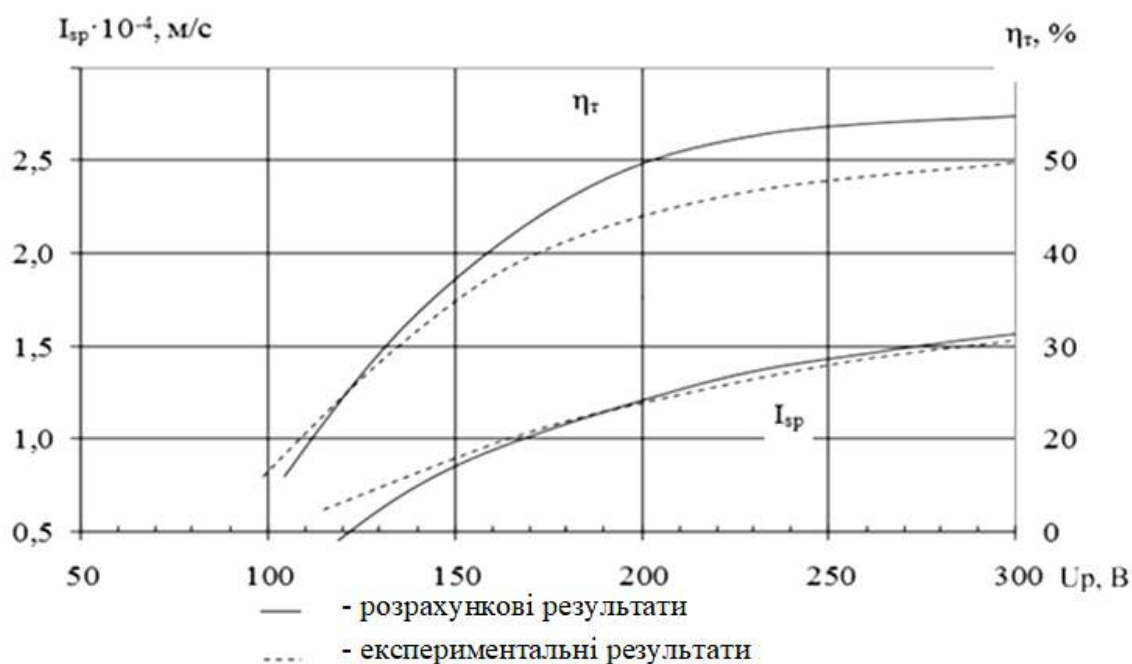


Рисунок 1.11 – Питомий імпульс I_{sp} і тяговий ККД η_{τ}

Розрахунок інтегральних характеристик СПД у діапазоні розрядних напруг до 1000 В проведено аналогічно тестовій задачі (рисунки 1.12, 1.13) і також може розглядатися як перевірка працездатності математичної моделі.

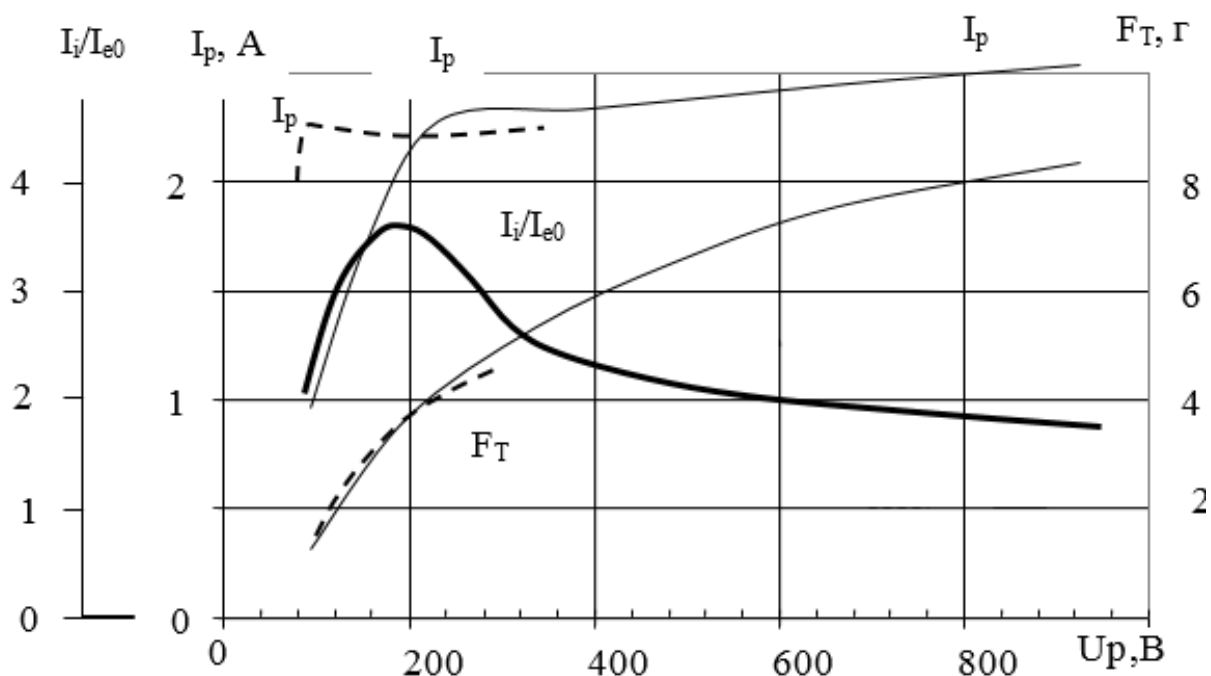


Рисунок 1.12 – Вольт-амперна характеристика та залежності тяги F_{τ} і співвідношення I_i/I_{e0} між сумарним іонним I_i і електронним струмами на виході із катода I_{e0} від розрядної напруги U_p

Залежність тягового ККД від напруги розряду відповідає відомим результатами експериментальних досліджень СПД, проведених з використанням двигуна іншого типорозміру (М-100). Але під час експериментів спостерігається зниження тягового ККД при напругах більше 500 В.

Розраховані також співвідношення іонного струму I_i на виході з двигуна до електронного струму на виході з катода I_{e0} . Визначені перепади потенціалу на ділянках від катода до входу в РК і на ділянці від входу в РК до анода (див. рисунок 1.14).

На основі аналізу результатів зроблено такий висновок: збільшення розрядної напруги понад 500 В веде до подальшого збільшення частки електронного струму I_{e0} з катода в РК, а саме в розрядний струм, а відповідні витрати потужності не покриваються збільшенням тяги, що призводить до зниження ККД двигуна.

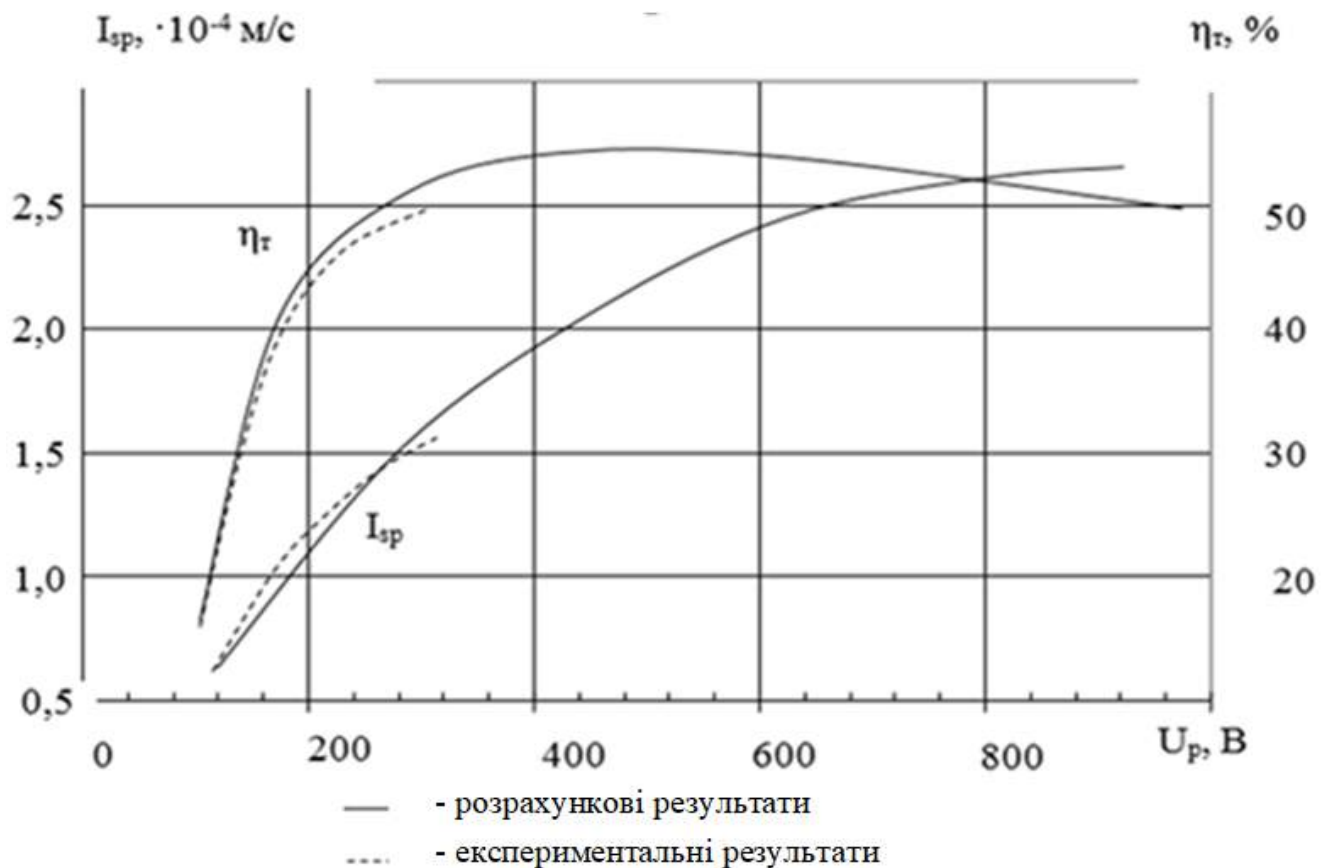


Рисунок 1.13 – Питомий імпульс I_{sp} і тяговий ККД η_T

Порівняльний аналіз експериментальних і розрахункових залежностей інтегральних характеристик дозволяє припустити, що розроблена гідродинамічна математична модель окремих процесів і інтегральних

характеристик СПД задовольняє цілі моделювання – розрахунок параметрів розряду в СПД при напругах понад 130 В на ділянці прискорювального режиму роботи двигуна.

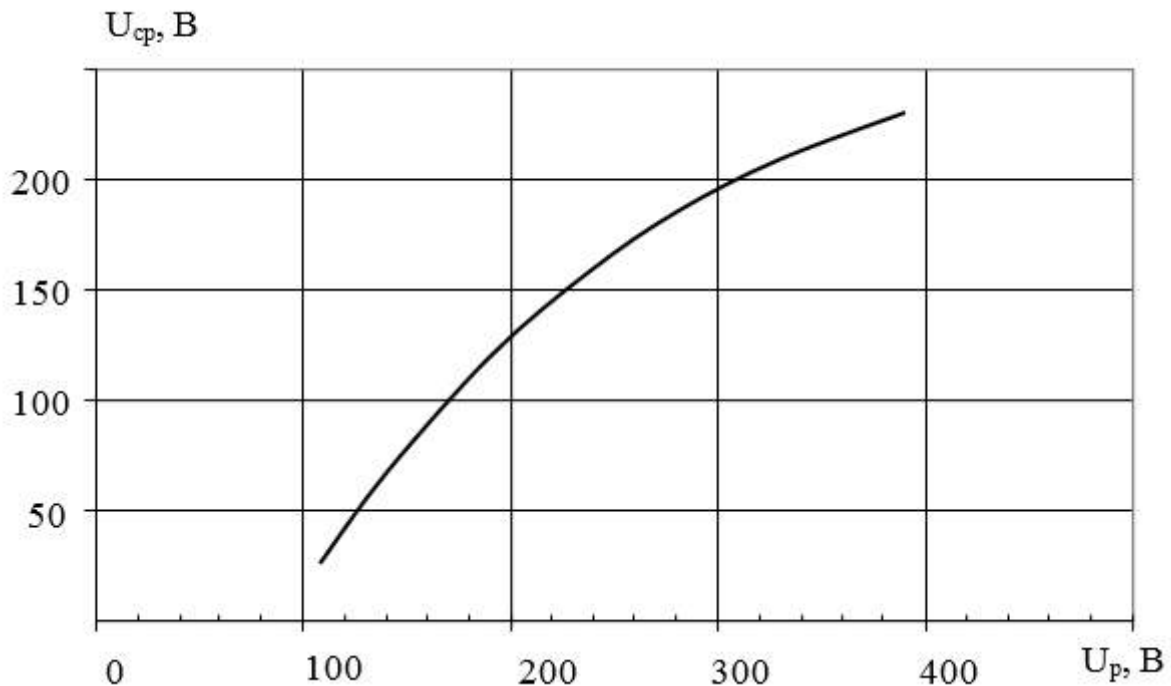


Рисунок 1.14 – Перепад потенціалу $U_{ср}$ на проміжку від входу в РК до катода при різній напрузі розряду U_p

Моделювання не досягає необхідного рівня точності при менших напругах розряду. Значні похибки моделі при низькій напрузі розряду – результат того, що не всі важливі механізми провідності електронів ураховані при побудові саме цієї моделі.

1.4.11 Висновки

Порівняльний аналіз окремих експериментальних і розрахункових значень інтегральних показників СПД, отриманих під час числового експерименту з використанням імовірнісної моделі, показує їх задовільну відповідність при напрузі розряду в діапазоні прискорювального режиму, і, таким чином, підтверджує можливість використання розробленої моделі у якості базової для детального вивчення процесів у СПД.

Подальше вдосконалення цієї моделі автори пропонують, у першу чергу, шляхом включення в неї процесів, які забезпечують провідність розрядного проміжку при низькій напрузі розряду. Вивчення закономірностей транспортування електронів у розрядному проміжку СПД заплановані як продовження досліджень.

З використанням розроблених базових математичних моделей процесів, включаючи процеси руху зарядів через розрядний проміжок двигуна, розподіл потенціалу поблизу стінок РК, можливий пошук шляхів удосконалення двигуна з метою поліпшення його інтегральних характеристик. Той факт, що в розрядній камері розподілена порівняно невелика частка (70...100 В) прикладеної розрядної напруги (150...300 В), а поблизу стінок зосереджений перепад потенціалів близько 90...120 В, який визначається емісійними властивостями матеріалу РУ, показує, що вибір матеріалу РК може істотно вплинути на процес ерозії РК і визначити ресурс усього двигуна. Той факт, що в РК поблизу середньої лінії значно підвищена концентрація електронів та іонів, є однією з важливих причин існування протяжної зони іонізації робочої речовини в РК СПД і потоку іонів, який розходить на стінки РК, і як наслідок – зниження тягового ККД двигуна. Оскільки вказані особливості розподілу зарядів є наслідком ефекту магнітних пробок поблизу полюсних наконечників СПД, то вибір певної конфігурації магнітної системи дозволить поліпшити фокусування потоку іонів і підвищити ККД двигуна. Існування поблизу анода зворотного перепаду потенціалів, в якому переноситься розрядний струм, є однією з причин зниження ККД двигуна. Найбільш істотною причиною такого розподілу електричного потенціалу є умова дифузії електронів на анод у швидкоспадаючому в бік анода магнітному полі. Створення конфігурації магнітного поля поблизу анода, яка б дозволила скоротити дифузний потік електронів на анод, – шлях збільшення ККД СПД.

Аналіз результатів наведених досліджень, а також досліджень, що проводилися протягом останніх 10–15 років ученими різних країн, показує, що важливою невирішеною проблемою залишається проблема провідності плазми в умовах схрещених електричного і магнітного полів. Визначивши основні закономірності перенесення зарядів, можливо уточнити закономірності основних взаємозв'язаних процесів у СПД:

- формування і розподіл електричного поля;
- рух електронів та іонів;
- формування потоку плазми.

На цій основі буде досягнуто розуміння того, як, змінюючи елементи конструкції СПД (магнітну систему, РК, розташування електродів), впливати на процеси в СПД для підвищення його характеристик.

2 РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕМЕНТІВ СПД

2.1 Магнітне поле СПД

2.1.1 Вплив зміни магнітної системи на розподіл магнітного поля у РК СПД

Відомо, що магнітне поле, створюване магнітною системою (МС) двигуна, великою мірою визначає інтегральні характеристики двигуна. Сучасні критерії, які використовуються при проектуванні магнітних систем, мають узагальнений характер і не дають конкретних вказівок, яким чином, наприклад, необхідно змінити магнітне поле, щоб збільшити ресурс двигуна до необхідних 10...30 тисяч годин. При цьому виявляється істотний вплив магнітного поля на всі інтегральні та ресурсні характеристики двигуна. Таким чином, дослідження впливу магнітного поля на фізичні процеси в двигуні є актуальним і необхідним завданням для створення умов поліпшення інтегральних характеристик двигуна.

При аналізі фізичних процесів у СПД широко використовується їх подання у вигляді зон іонізації і прискорення. Основні фізичні процеси, а це процеси іонізації і прискорення, відбуваються у РК повсюди, проте для простоти їх аналізу можливе виділення областей, у кожній з яких відбувається переважно свій процес. На підставі експериментальних даних у РК СПД можна виділити три умовні зони (рисунок 2.1): прианодну зону (ПЗ), зону іонізації (ЗІ) і зону прискорення (ЗП). Зона іонізації визначається максимальними значеннями іонного струму, а зона прискорення – значним падінням електричного потенціалу ϕ . Прианодна зона відокремлює ЗІ і ЗП від анода і може займати до 2/3 довжини РК. Іоноутворення і зміна електричного потенціалу в прианодній області незначні. У зв'язку з перекриттям зон іонізації і прискорення часто виділяють єдину зону іонізації і прискорення (ЗІП) [6–8]. Ширина ЗІП зазвичай порівнянна з шириною каналу, і в сучасних двигунах становить $\approx 1...1,5$ см.

Відомо, що форма, протяжність, положення у каналі двигуна, а також взаємне розташування одна відносно одної зазначених вище зон мають істотний вплив на вихідні характеристики двигуна.

Протяжність ЗІП. Наявний в РК СПД переріз ЗІ і ЗП, а також істотна їх протяжність призводять до того, що іонізування у різних місцях ЗП частки робочого тіла, прискорюються різним перепадом електричного потенціалу. Відповідно до цього на виході з двигуна іони мають розкид за швидкостями (енергії). Функція розподілу іонів за швидкостями (рисунок 2.1) має вигляд, відмінний від дельта-функції, як це, наприклад, має місце в плазмово-

іонних двигунах (ПІД), у яких зони іонізації і прискорення відокремлені одна від одної.

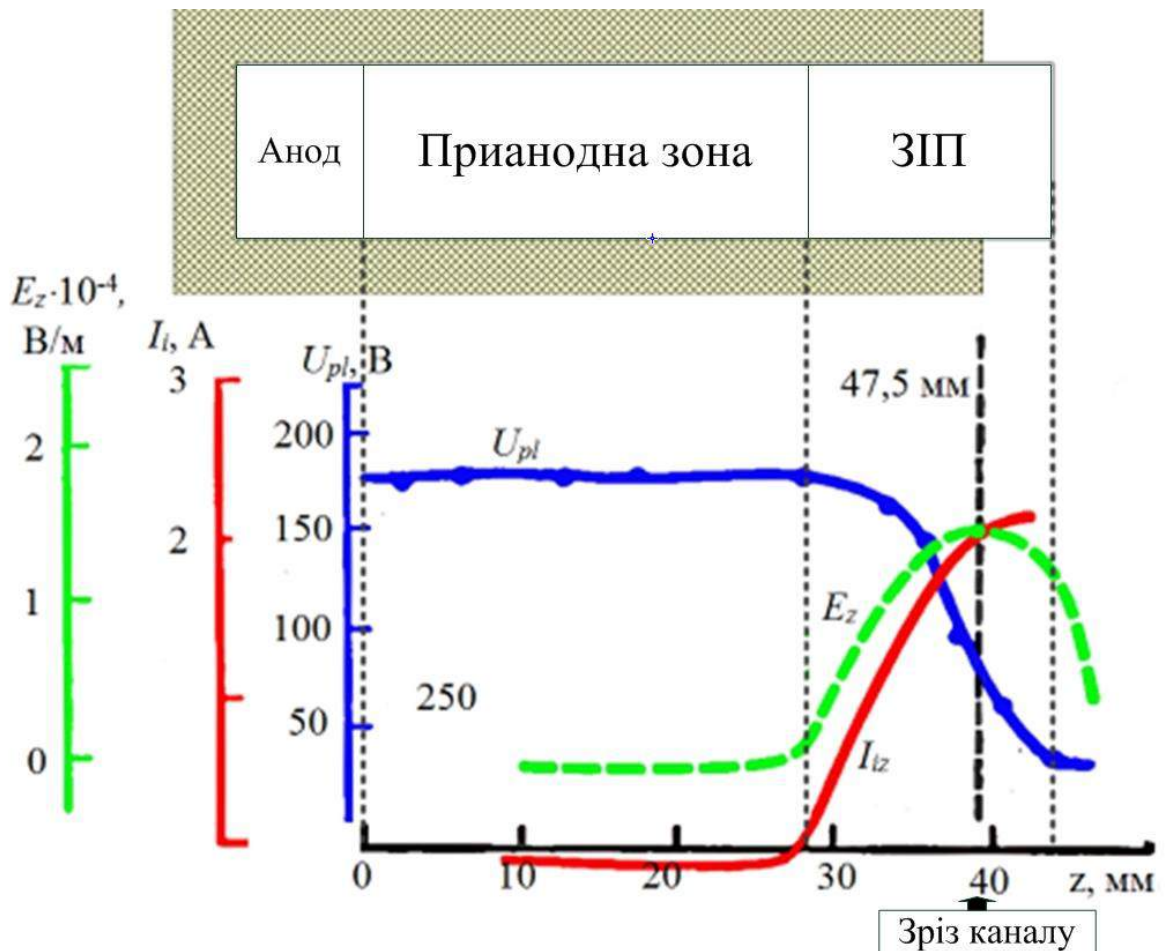


Рисунок 2.1 – Розподіл РК на зони з характерним розподілом електричного потенціалу ϕ , а також іонним струмом I_i

Так званий коефіцієнт монохроматичності струменя двигуна, що враховує зниження тяги двигуна за рахунок розкиду іонів за швидкостями, виражається такою залежністю:

$$\eta_v = \frac{\langle v_i \rangle^2}{\langle v_i^2 \rangle}, \quad (2.1)$$

де $\langle v_i \rangle^2$ – квадрат середньомасової швидкості іонів у струмені двигуна;

$\langle v_i^2 \rangle$ – середньоквадратична швидкість іонів у струмені двигуна.

Розрахунок η_v може бути зроблений за виміряною функцією розподілу іонів за швидкостями (ФРІШ), наприклад на контрольній поверхні, що охоплює струмінь двигуна. Однак в силу труднощів визначення ФРІШ на практиці окремо визначають функцію розподілу іонів за енергіями і

функцію розподілу густини іонного струму, за допомогою яких і перераховують значення коефіцієнтів, як це, наприклад, зроблено в роботах за допомогою зондів енергоаналізаторів.

Кривизна 3П. Розподіл електричного поля по ширині каналу в 3П не є рівномірним. Як показано на рисунку 2.2, екіпотенціальні лінії в РК мають кривизну. Опуклість ліній у напрямку виходу з двигуна формує потік іонів (рисунок 2.3), який розходить під великим кутом щодо осі двигуна.

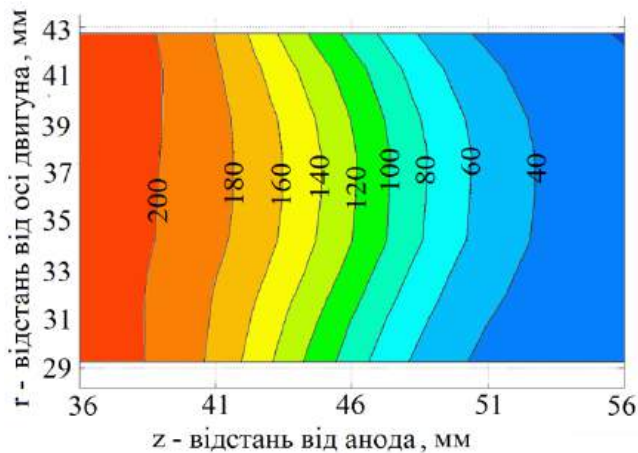


Рисунок 2.2 – Розподіл електричного потенціалу в РК СПД

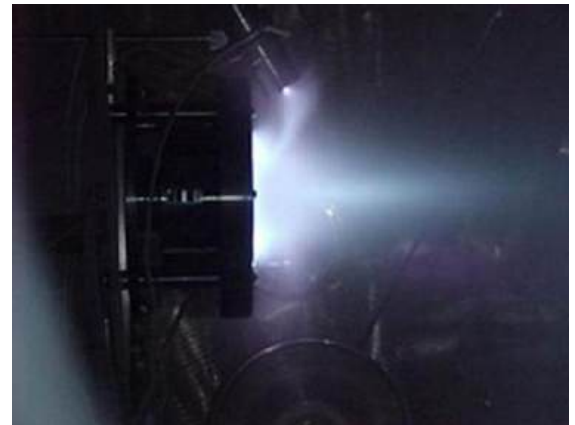


Рисунок 2.3 – Плазмовий струмінь СПД

Розбіжність струменя є видом утрат тяги двигуна і визначається коефіцієнтом η_β :

$$\eta_\beta = \frac{\langle v_{i,z} \rangle^2}{\langle v_i^2 \rangle}, \quad (2.2)$$

де $\langle v_{i,z} \rangle^2$ – квадрат середньомасової швидкості іонів уздовж осі двигуна;

η_β визначається за допомогою зондової діагностики струменя двигуна.

У зоні видимості іонного потоку знаходяться стінки РК (рисунок 2.4), які в результаті бомбардування іонами еродують. Найбільш схильними до ерозії є вихідні кромки стінок каналу (рисунок 2.5). Ерозія стінок каналу – основний чинник, що обмежує ресурс двигуна.

Розбіжність струменя двигуна розглядається не тільки як вид утрат ККД, але і як окрема характеристика двигуна. Еродований матеріал стінок РК, а також матеріали інших елементів двигуна можуть осідати на чутливі до забруднень елементи КА, такі, як сонячні батареї, радіо- і оптично-прозорі елементи систем КА (рисунок 2.6).

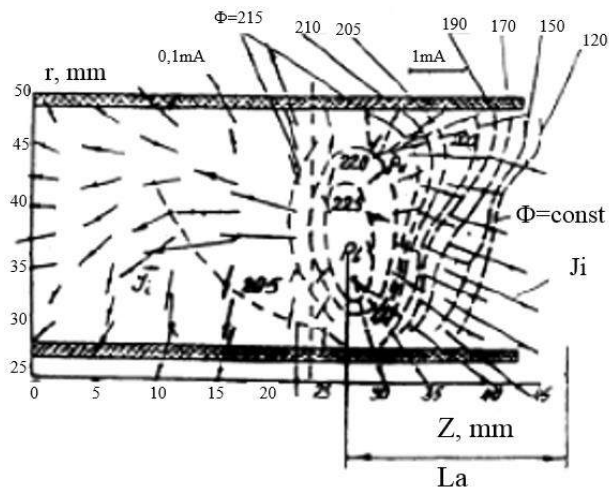


Рисунок 2.4 – Діаграма спрямованих іонних потоків у РК

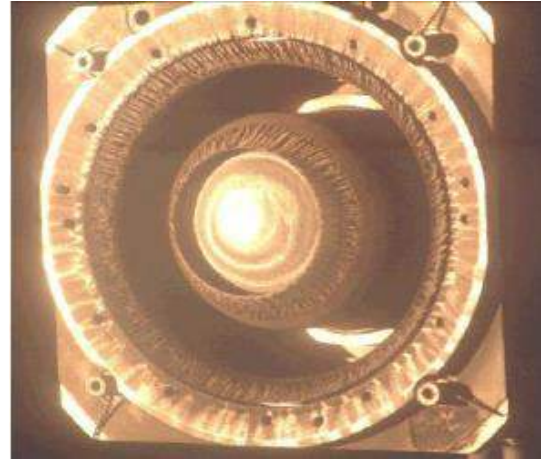


Рисунок 2.5 – Ерозія вихідних кромок РК СПД



Рисунок 2.6 – Кут розходження струменя плазмового двигуна і сонячних панелей КА

Поздовжнє положення ЗІП істотно впливає на вихідні й ресурсні характеристики двигуна. Оскільки іонний потік, що формується в ЗІП, розходить на великий кут, тоді, чим глибше знаходиться ЗІП відносно вихідного перерізу двигуна, тим більша кількість іонів буде гинути на стінках каналу. Наочним прикладом підвищених витрат іонів на стінках є конструкція СПД 70-х років з протяжністю прискорювального каналу (ПК) у 4–10 разів більше, ніж у сучасних моделей (135 мм проти 15–30 мм). Експериментальні дослідження двигуна показали, що іонний струм досягає своїх максимальних значень у середині каналу, а далі – у напрямку виходу з КН – спостерігається взаємодія іонів зі стінками каналу, у результаті чого іонний струм зменшується на 35...40 %. З одного боку, це призводить до

додаткових енергетичних витрат, з іншого – зменшується коефіцієнт використання маси РТ η_m . Оцінка η_m може бути зроблена таким чином:

$$\eta_m = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_a} = \frac{M I_b}{e} \frac{I}{\dot{m}_a}, \quad (2.3)$$

де $\dot{m}_i$ – масова витрата іонів на виході з двигуна;

I_b – сила струму іонів.

Зсув ЗІП усередину РК буде призводити до збільшення ширини пасків ерозії на стінках каналу, що еквівалентно зниженню ресурсу двигуна. Одним з можливих способів збільшення його ресурсу є створення СПД з винесеною ЗІП за зріз двигуна. Частково це реалізовано в сучасних двигунах, в яких падіння потенціалу за зрізом може досягати 80 % від усієї прискорювальної напруги.

Положення ядра іонізації. Експериментально виявлено, що «ядро іонізації» (область, в якій іонний струм максимальний) є зміщеним до внутрішньої стінки каналу. Це пояснює той факт, що найбільше до ерозії схильна внутрішня стінка РК. На внутрішню стінку «випадає» більша кількість іонів при характерному розфокусованому розподілі потенціалу (див. рисунок 2.2) і зміщеному ядрі іонізації. Поздовжнє положення ядра іонізації так само може впливати на характеристики двигуна. Важливо, щоб ядро іонізації розташовувалося на початку ЗІП, а еквіпотенціальні лінії були опуклими в бік анода. У цьому випадку потік іонів буде відтискатися від стінок каналу в напрямку середини ПК, де при значній кривизні еквіпотенціальних ліній іони прискорюються в напрямку, близькому до поздовжнього.

Протяжність прианодної зони. Процеси в прианодній зоні проходять з низькою інтенсивністю і можуть бути охарактеризовані як втрати питомої імпульсу двигуна (тобто втрат, пов'язаних з розбіжністю струменя, розкидом іонів за енергіями, неповною іонізацією, недовикористанням прикладеної розрядної напруги), при цьому протяжність зони досить висока – від $\approx 2/3$ до 90 % усієї довжини каналу. Експериментально виявлено, що скорочення прианодної зони за рахунок висунення анода в напрямку вихідного перерізу дещо покращує характеристики двигуна. Однак при попаданні анода в ЗІП характеристики двигуна різко погіршуються – збільшується розрядний струм, збільшується рівень коливальності розрядної напруги, знижуються питомий імпульс і тяговий ККД двигуна в цілому.

Таким чином, виходячи зі сказаного вище, розподіл процесів іонізації і прискорення в РК мають значний вплив на вихідні і ресурсні характеристики двигуна. Для усвідомленого впливу і управління розподілом зазначених процесів необхідно розуміти вплив на них різних

факторів.

2.1.2 Аналіз впливу магнітного поля на властивості ЗІП

Магнітне поле є найбільш визначальною вихідною характеристикою двигуна. Причини цього стають зрозумілими після розгляду ролі МП у формуванні розподілу електричного поля.

Основним механізмом прискорення іонів у СПД є прискорення електричним полем, створюваним за рахунок застосування різниці потенціалів до обсягу плазми. Для того щоб висока рухливість електронів не перешкоджала існуванню цього поля і назустріч іонам не йшов значно більший електричний струм (з огляду на значну різницю мас іонів і електронів), у ПК цілеспрямовано формується радіальне магнітне поле, що замагнічує електрони і перешкоджає їх поздовжньому переміщенню. Густина струму електронів $j_{e\perp}$ уздовж електричного і поперек магнітного полів така:

$$j_{e\perp} = \sigma_{e\perp} E_{\perp}, \quad (2.4)$$

де $\sigma_{e\perp}$ – ефективна електронна провідність плазми поперек магнітного поля.

Сформований магнітною системою осьовий розподіл радіального магнітного поля в КК має дзвоникоподібний вигляд, максимальне значення якого розташоване поблизу вихідного перетину (рисунок 2.7). Експериментально виявлено, що основне падіння потенціалу зосереджено саме в області максимальних значень індукції магнітного поля, тобто там, де провідність плазми мінімальна. У цьому випадку провідність плазми, істотно залежить від величини МП. Провідність плазми еквівалентна дільнику напруги (рисунок 2.8). Таким чином, задаючи розподіл індукції МП у РК, можна змінювати розподіл електричного поля, тобто властивості ЗІП.

Дійсно, існує емпіричний зв'язок між величиною МП і початком ЗП. У різних джерелах автори показують, що нижня межа ЗІП (з боку анода) відповідає $(0,6 \dots 1,0) \cdot Br_{\max}$, де $Br_{\max}$ – максимальне значення радіальної складової магнітної індукції на серединній лінії каналу. Повсюдно використовується прив'язка до $Br_{\max}$ на серединній лінії не є найвдалішою, оскільки при одному і тому ж $Br_{\max}$ на серединній лінії ЗП по ширині каналу може починатися в різних місцях. Так, наприклад, у роботі [14] показано, що ЗІП у серединній частині каналу починається раніше, ніж біля зовнішньої і внутрішньої стінок, при цьому спостерігається також відмінність у положенні початку ЗП і між самими стінками.

Приймається, що верхньою межею ЗІП є положення $Br_{\max}$, яке, як було вже сказано, у сучасних СПД розташоване поблизу площини зрізу РК, як

правило, з боку анода. Однак єдина думка щодо точного положення верхньої межі ЗІП відсутня, оскільки неодноразово експериментально підтверджувалося, що прискорення потоку іонів триває і за зрізом двигуна. Згідно з різними джерелами падіння напруги за зрізом може досягати більше 80 % від прикладеної розрядної напруги на відстані до 10...30 мм.

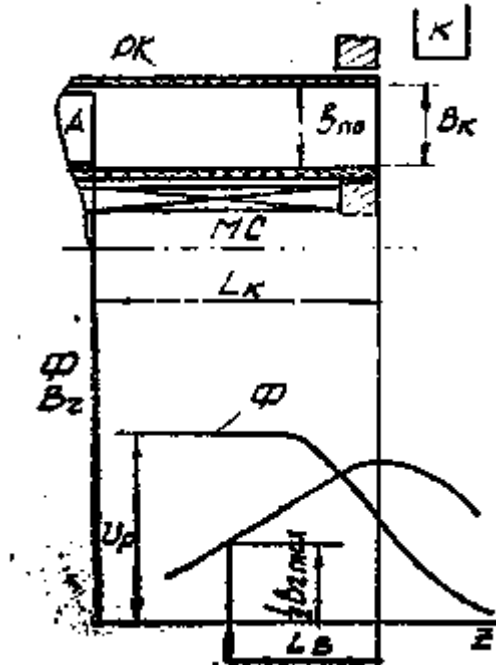


Рисунок 2.7 – Розподіл потенціалу й індукції МП у РК СПД

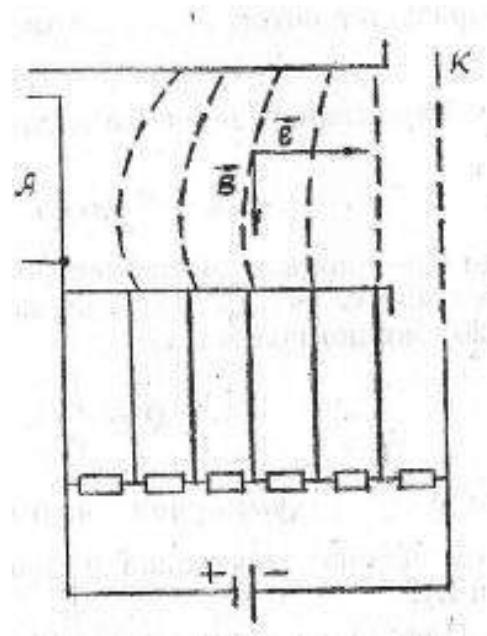


Рисунок 2.8 – Схема розподілу потенціалу у РК СПД

Прив'язка меж ЗП до магнітного поля дозволяє за рахунок зміни закону розподілу B_r , з одного боку, переміщувати ЗП у РК, з іншого - впливати на протяжність ЗІП. Як підтвердження про зв'язок положення $B_{r_{max}}$ з положенням ЗІП у РК можна навести результати, опубліковані в [5], де на прикладі положення $B_{r_{max}}$ у різних перетинах по ширині каналу показано, що ЗІП починається раніше там, де ближче $B_{r_{max}}$ до анода, і навпаки. Так само автори відзначають, що з боку, де $B_{r_{max}}$ розташоване ближче до анода, ширина пояса ерозії більша, це підтверджує зміщення ЗІП у напрямку анода. Збільшення швидкості наростання $B_r(z)$, тобто скорочення області з максимальними значеннями B_r , призводить до скорочення протяжності ЗІП. Однак указується, що існує оптимальне значення dB_r/dz , при якому забезпечуються максимальні характеристики двигуна. Вище певного значення – dB_r/dz .

Так, у роботі [14] показано, що з перевищенням деякого значення dB_r/dz спостерігаються зменшення іонного струму на виході з двигуна, збільшення амплітуди коливань напруги розряду і зменшення ККД двигуна в цілому.

Існує емпіричний зв'язок між магнітним полем і шириною пасків ерозії

вихідних кромek ПК. Межі зон ерозії на внутрішній і зовнішній стінках КК з боку анода знаходяться на перетині зі стінками каналу однієї силової лінії магнітного поля, що проходить через величину $kB_{r\max}$ по серединній лінії ПК (рисунок 2.9). Числові значення коефіцієнта k для кожного випадку різні.

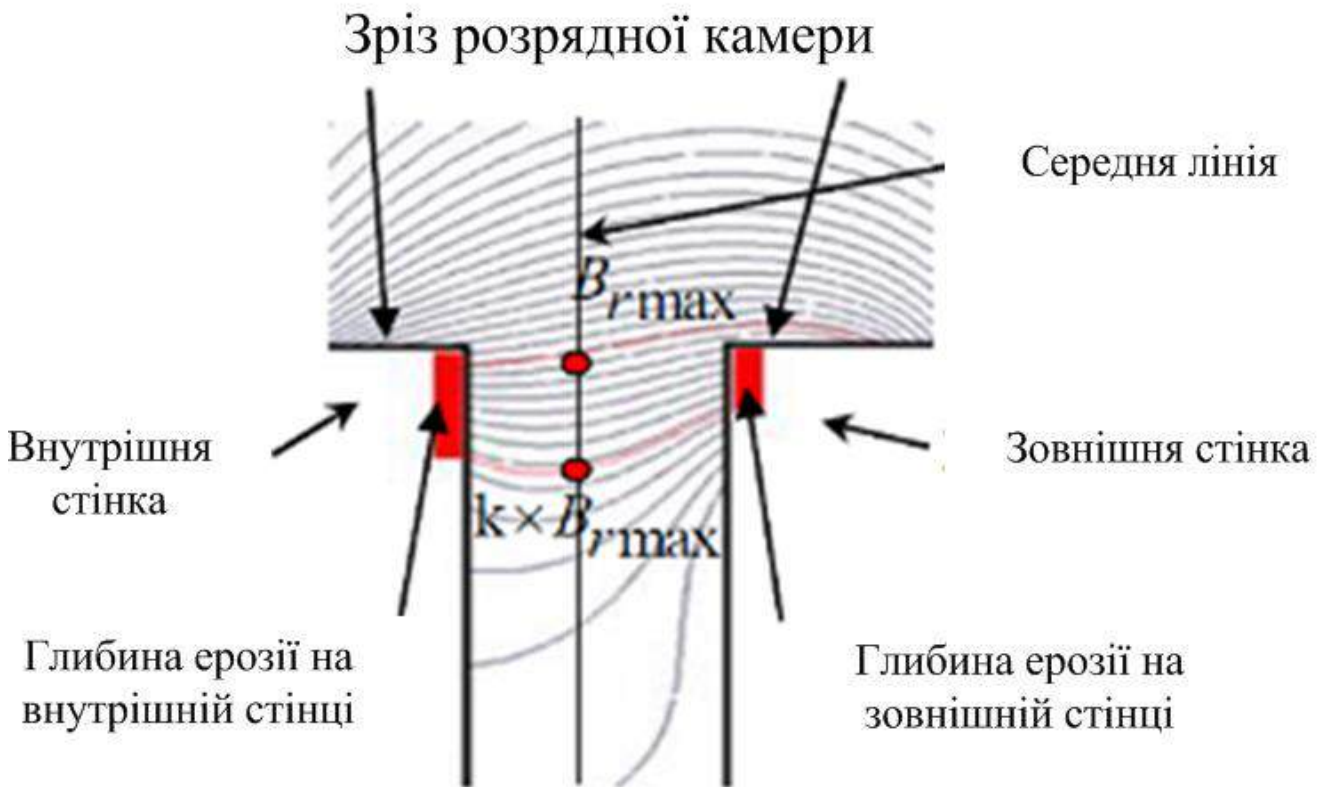


Рисунок 2.9 – Схема прив'язки ширини пасків ерозії стінок РК до СМЛ

Іншим відомим способом впливу на форму ЗІП є зміна конфігурації силових магнітних ліній (СМЛ) у РК СПД. За рахунок того що рух електронів уздовж СМЛ відбувається відносно вільно, уздовж СМЛ відбувається вирівнювання електричного потенціалу. Таким чином, конфігурація ліній однакового електричного потенціалу (еквіпотенціальних ліній) може збігатися з конфігурацією СМЛ. На цьому основана ідея управління розподілом електричного поля за рахунок формування відповідного профілю СМЛ. Єдина думка, яким має бути профіль СМЛ у РК, відсутня. Найкращі характеристики забезпечуються при конфігурації СМЛ, близькою до симетричної щодо серединної лінії каналу, але з невеликим нахилом до осі двигуна (рисунок 2.10).

В інших роботах вважається, що «ідеальним» є такий профіль МП, у якого СМЛ біля анода є опуклими в бік анода, для чого використовується додаткова анодна «trim» котушка. Уважається, що при такій конфігурації силових магнітних ліній (рисунок 2.11) біля анода формується профіль електричного поля, що відтискує потік іонів від стінок на середину каналу.



Рисунок 2.10 – Оптимальна конфігурація СМЛ

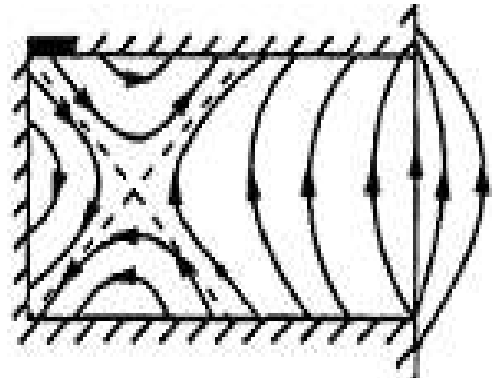


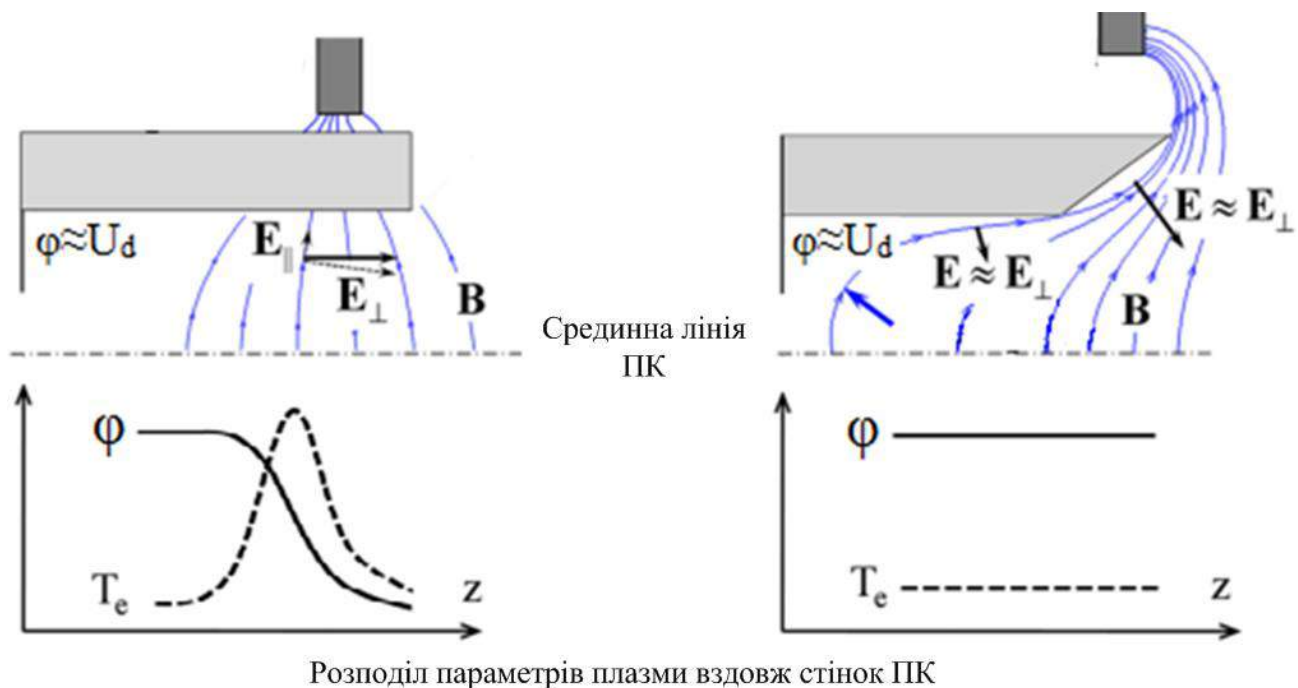
Рисунок 2.11 – Ідеальний профіль з «trim» котушкою

Ця ж ідея лежить у концепції «магнітного екранування» стінок РК. Передбачається, що якщо створити таке МП у РК СПД, у якого частина силових магнітних ліній проходить уздовж стінок РК, то в силу еквіпотенціалізації СМЛ уздовж стінки каналу утворюватиметься шар з електричним потенціалом, близьким до анода, і низькою температурою електронів (1...3 еВ). У такому випадку кінетична енергія іонів, що бомбардують стінки, знижувалася б до значень, менших за рівень енергії порогу розпилення. Крім того, поблизу стінок РК напруги електричного поля набувало б радіального напрямку, що приводило б до відтискання іонів від стінок РК (рисунок 2.12).

Однак на практиці спостерігається відхилення еквіпотенційних ліній від СМЛ (рисунок 2.13). У поведінці еквіпотенційних ліній можна виявити деяке прагнення накластися на СМЛ, однак говорити про їх повне співпадіння неможливо. Крім того, незважаючи на реалізацію фокусу профілю СМЛ і відтискання іонного потоку від стінок каналу, робота СПД без ерозії так і не була продемонстрована. Наслідком порушення цієї ідеї є те, що при проектуванні і оптимізації МС двигуна використання профілю СМЛ можливе тільки як якісний критерій. Спиратися на нього не можна.

Розподіл МП впливає на просторове положення ядра іонізації – найбільш інтенсивна іонізація газу по довжині каналу спостерігається в області максимуму dBr/dz , обчисленого на серединній лінії РК. У роботі [14] пропонується використовувати функцію, положення максимуму якої у РК збігається з положенням ядра іонізації. Математично функція являє собою проекцію градієнта величини $|\vec{B}|$ на напрям, перпендикулярний до вектора $\vec{B}$:

$$F_B(\vec{r}) = \frac{|\vec{B}(\vec{r}) \times \nabla |\vec{B}(\vec{r})||}{|\vec{B}(\vec{r})|}. \quad (2.5)$$



а

б

Рисунок 2.12 – Схема магнітного екранування стінок РК СПД:
а – класична конфігурація СМЛ; б – конфігурація «екрануючих» СМЛ

Викладене можна узагальнити в такий спосіб:

а) розподіл магнітного поля має вплив на розподіл процесів іонізації і прискорення РТ у РК СПД, що підтверджується численними дослідженнями;

б) існуючі кореляції МП і положення зон іонізації і прискорення є узагальненими і не дають конкретних настанов з управління положенням ЗІП;

в) використання прив'язки положення ЗІП до розподілу B_r тільки на серединній лінії ПК не дозволяє управляти ЗІП по всій ширині каналу, тобто завдання необхідно розглядати в двовимірному вигляді – по довжині і по ширині ПК;

г) конфігурація СМЛ не є достовірно точним інструментом для управління профілем електричного поля у РК СПД.

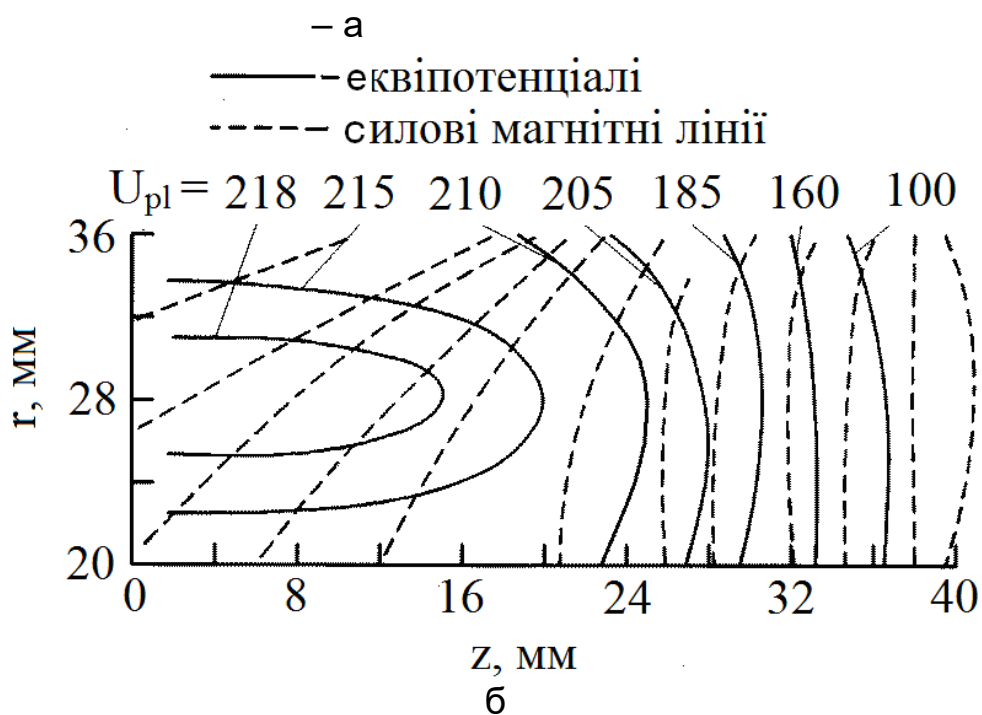
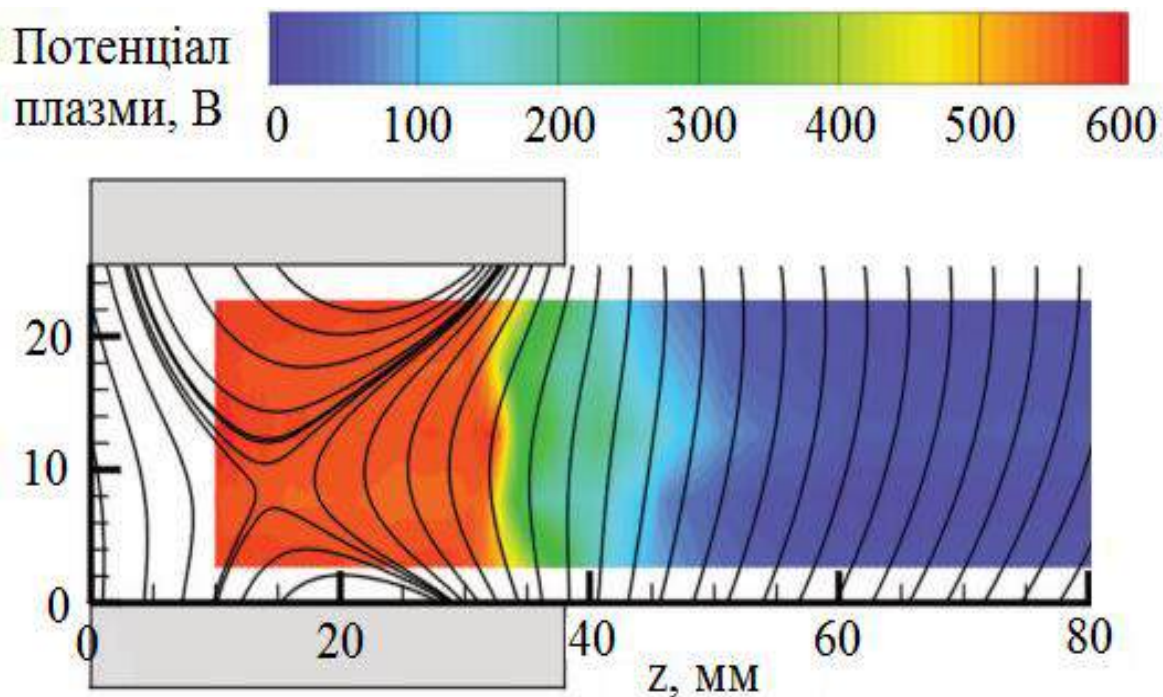


Рисунок 2.13 – Конфігурація екіпотенціалей і СМЛ у РК СПД:
а – потенціал плазми; б – екіпотенціалі і СМЛ

2.1.3 Вплив зміни магнітопроводу на розподіл магнітного поля у РК стаціонарного плазмового двигуна малої потужності

На основі конфігурації МСПД показана розрахункова 2D-модель двигуна (рисунок 2.14). За допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) проведено моделювання розподілу магнітного поля в РК СПД. Із зміною геометричних параметрів магнітопроводу визначена конфігурація магнітної системи, що забезпечує максимальний градієнт радіальної складової магнітної індукції уздовж РК, а також найбільш фокусуючу конфігурацію магнітних силових ліній (МСЛ) (рисунок 2.14).

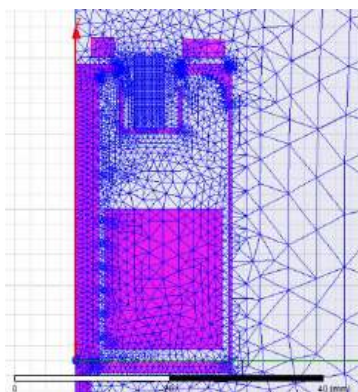


Рисунок 2.14 – Розрахункова 2D-модель двигуна

На основі розмірів конструкції моделі СПД створена розрахункова 2D-модель у пакеті Ansoft Maxwell 14.0, в якому і проводилося подальше моделювання МП.

2.1.4 Вплив додаткових котушок і глибини магнітного анода

У першу чергу було прийнято рішення ввести додаткові котушки перед сердечником і перед зовнішнім полюсом, а також збільшити глибину магнітного екрана (анода) [9–12]. Змінні параметри наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Варіанти виконання конструкції двигуна

№ п/п	Варіант конструкції
1	Базовий варіант
2	Базовий варіант з котушкою перед сердечником
3	Базовий варіант з котушкою перед зовнішнім полюсом
4	Базовий варіант з котушкою перед сердечником і з котушкою перед зовнішнім полюсом
5	Подовжений магнітний анод
6	Подовжений магнітний анод з котушкою перед сердечником

Продовження таблиці 2.1

№ п/п	Варіант конструкції
7	Подовжений магнітний анод з котушкою перед зовнішнім полюсом
8	Подовжений магнітний анод з котушкою перед сердечником і перед зовнішнім полюсом
9	Подовжений магнітний анод з котушкою в аноді
10	Подовжений магнітний анод з котушкою в аноді і перед зовнішнім полюсом
11	Подовжений магнітний анод з котушкою в аноді, перед зовнішнім полюсом і перед сердечником

Графічне відображення результатів моделювання показано на рисунках 2.15–2.25.

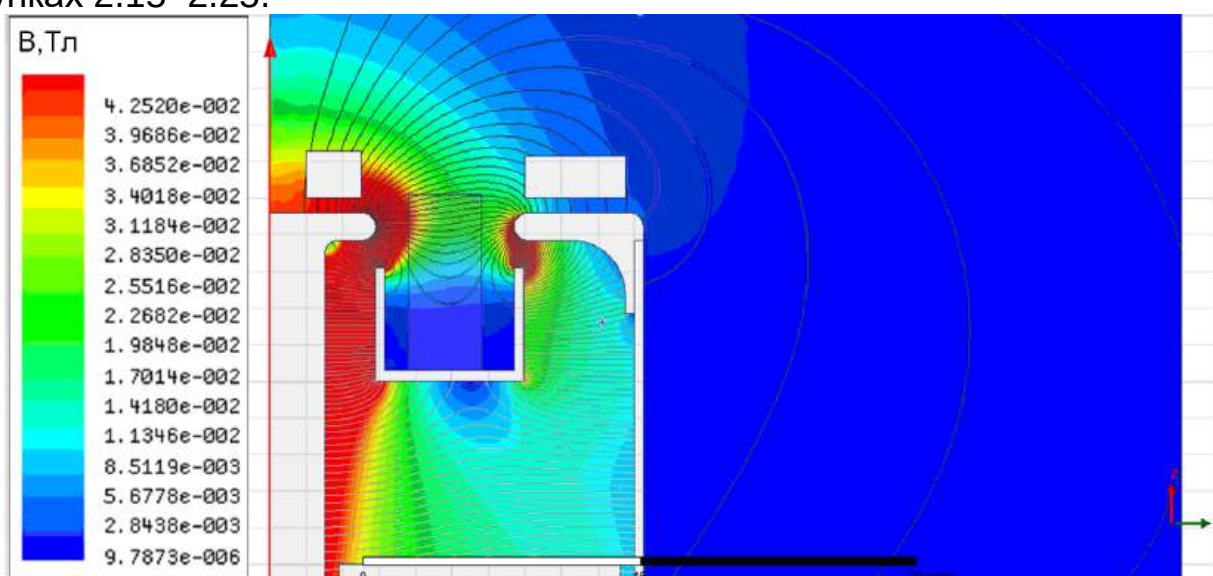


Рисунок 2.15 – Результати розрахунку B базового варіанта конструкції

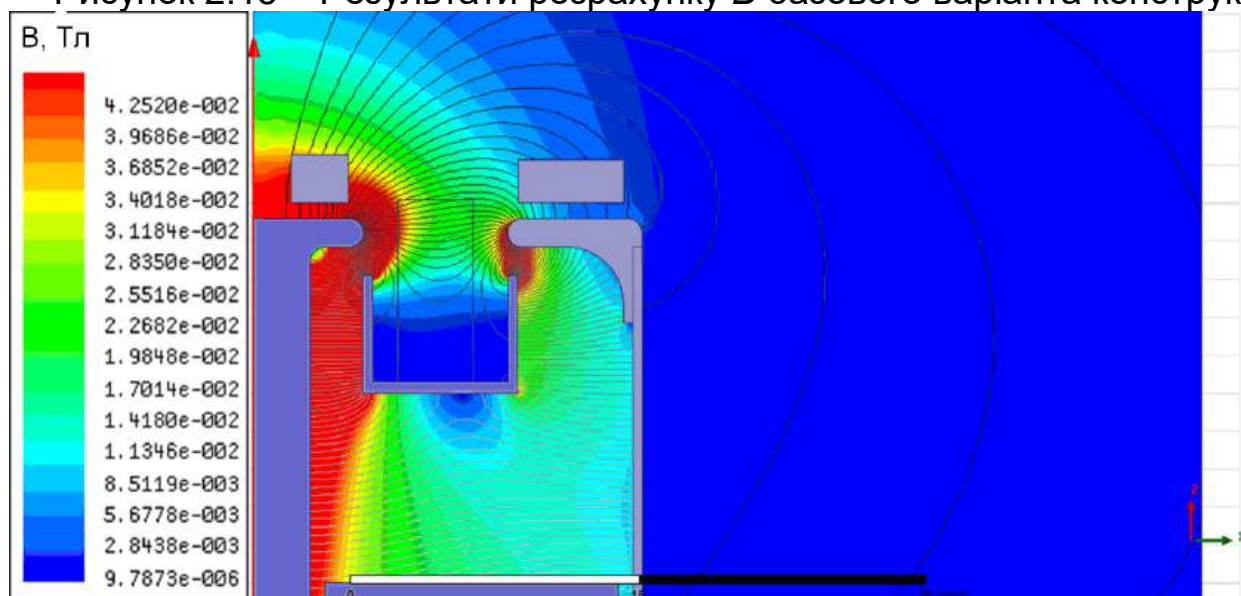


Рисунок 2.16 – Результати розрахунку B при розташуванні котушки перед сердечником

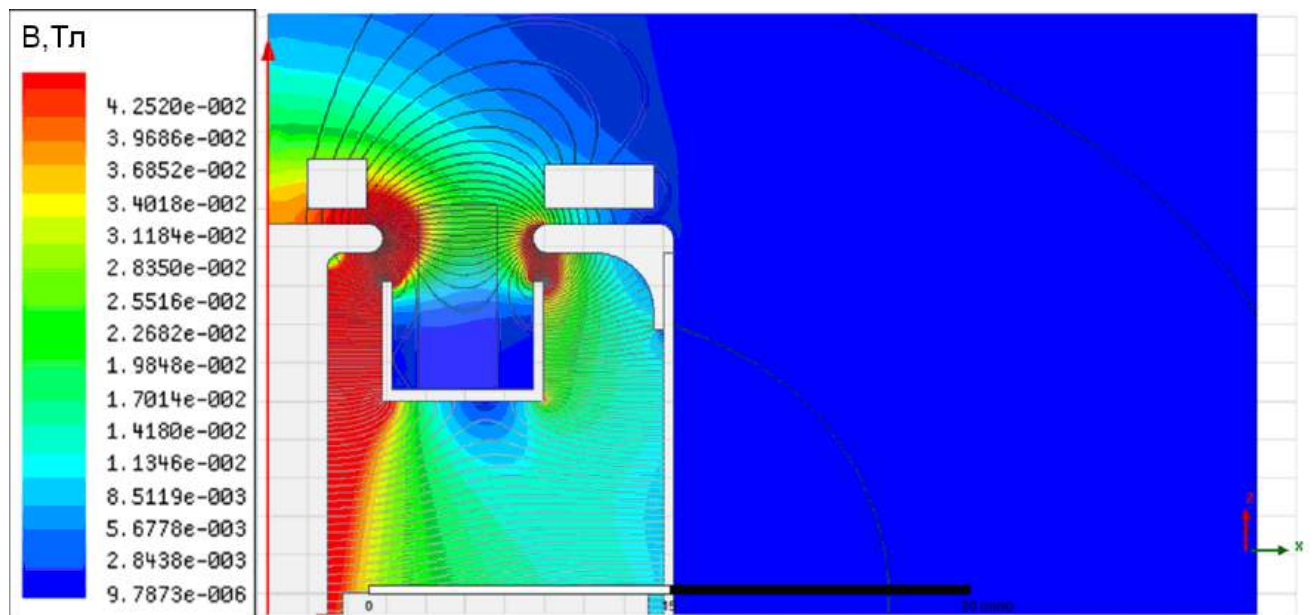


Рисунок 2.17 – Результати розрахунку B при розташуванні котушки перед зовнішнім полюсом

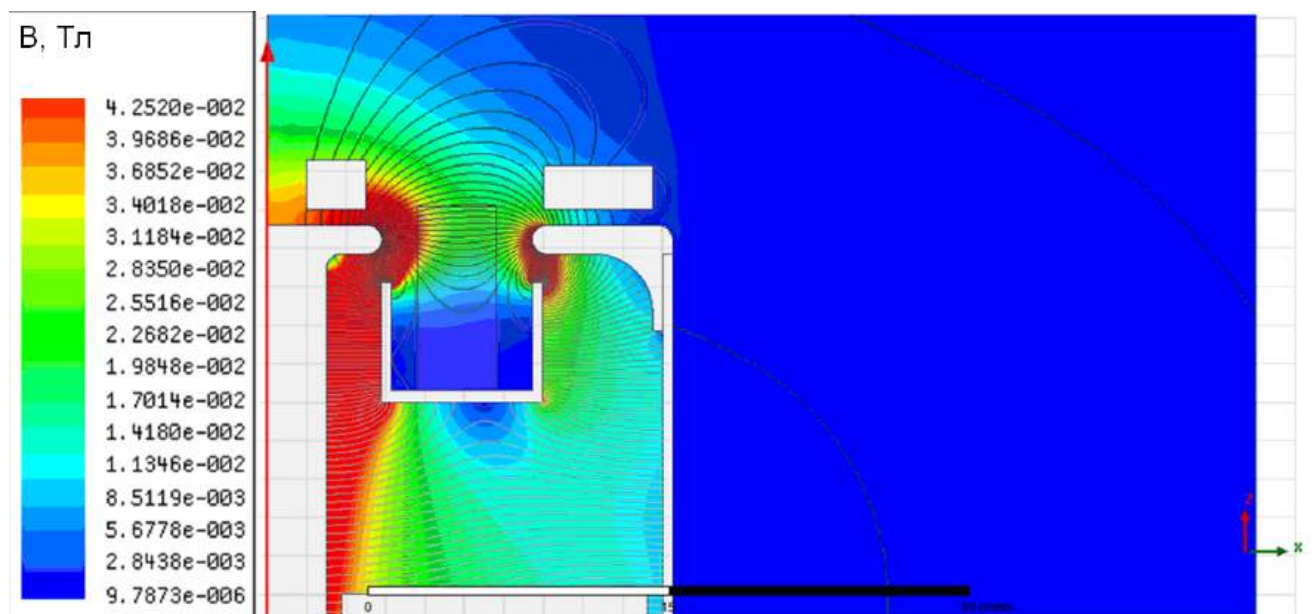


Рисунок 2.18 – Результати розрахунку B для варіантів 2 і 3 таблиці 2.1

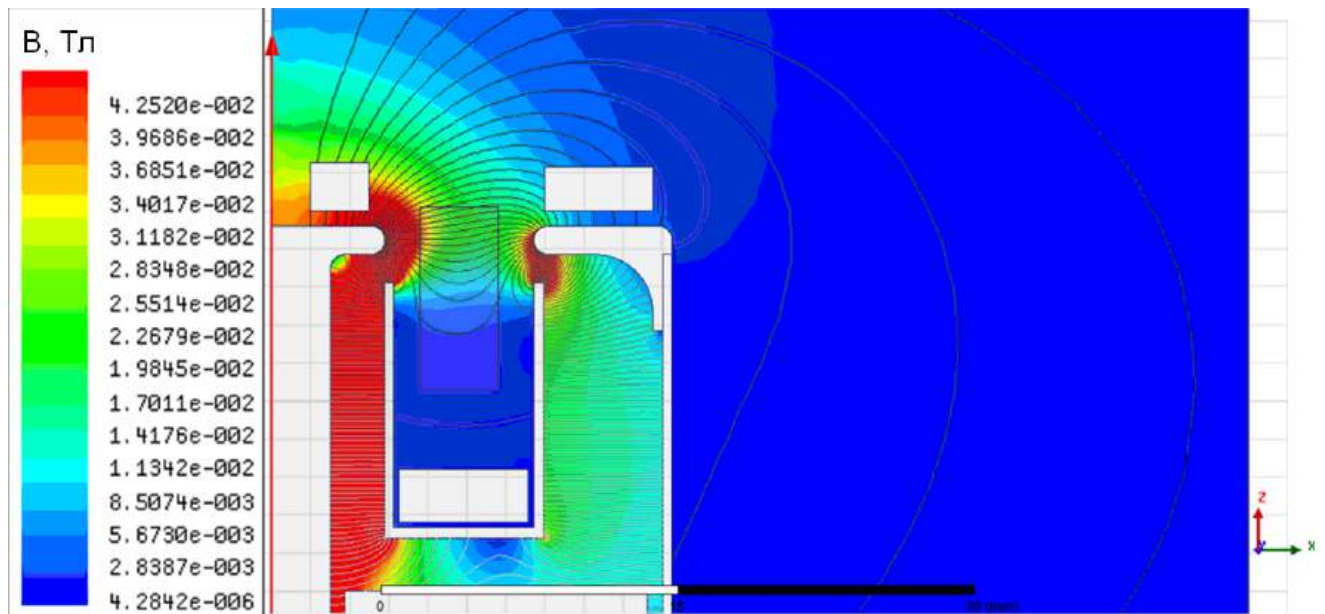


Рисунок 2.19 – Результати розрахунку B для конструкції з подовженим магнітним анодом

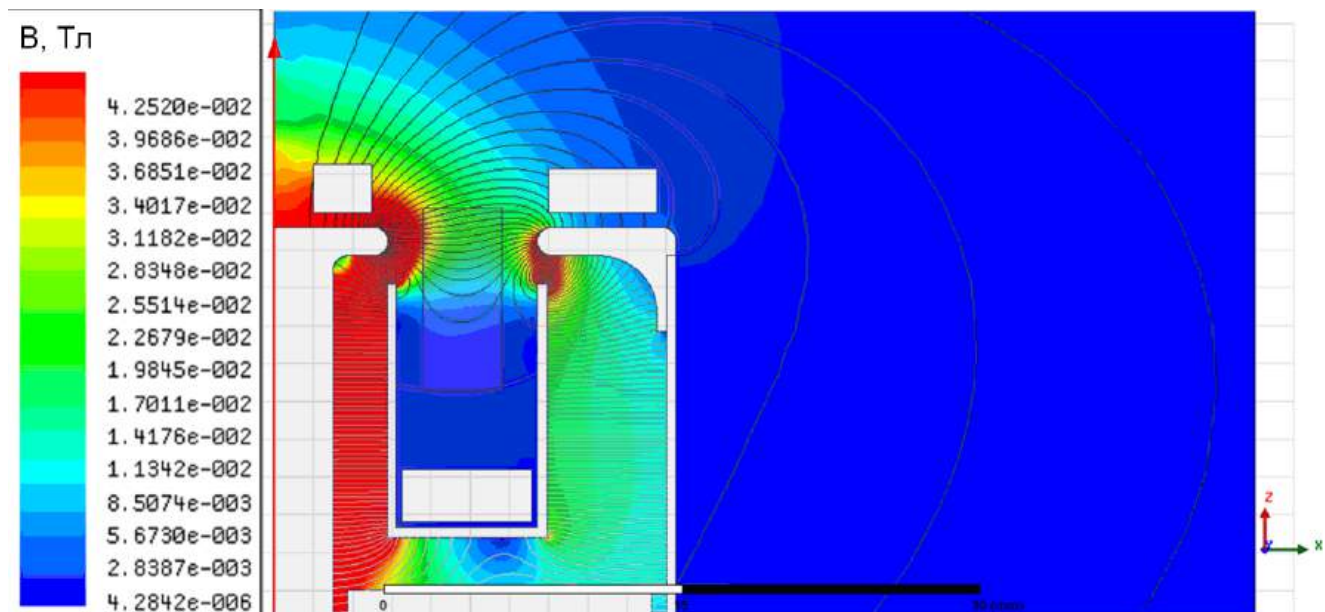


Рисунок 2.20 – Результати розрахунку B для конструкції з подовженим магнітним анодом, котушка перед сердечником

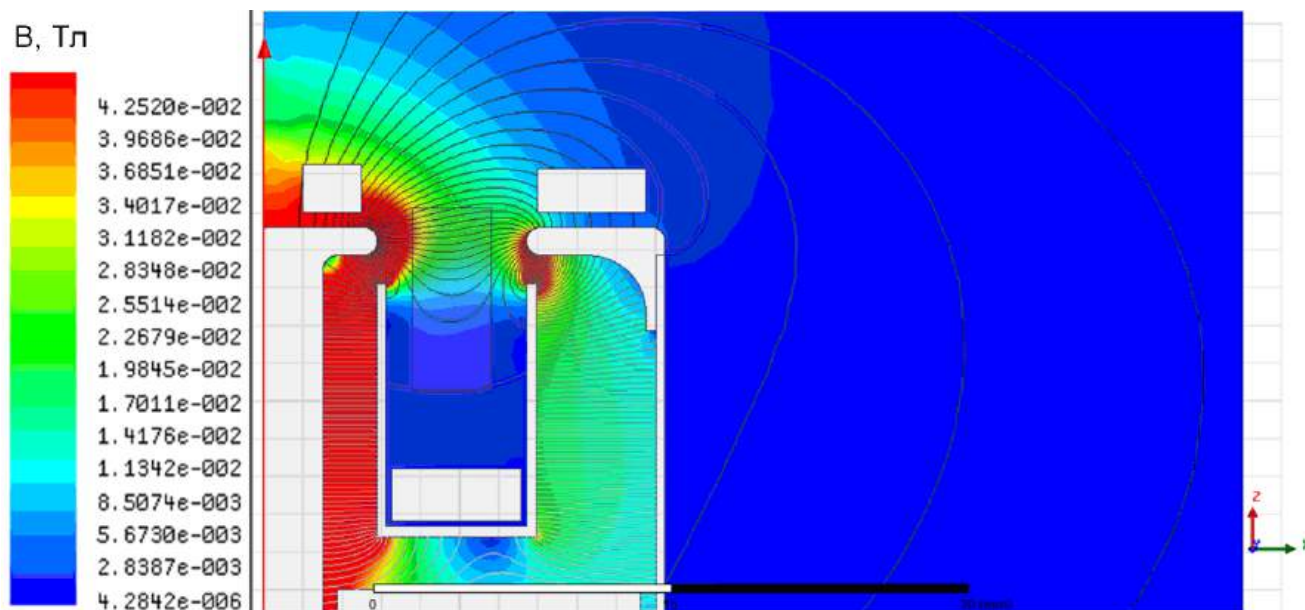


Рисунок 2.21 – Результати розрахунку B для конструкції з подовженим магнітним анодом, котушка перед зовнішнім полюсом

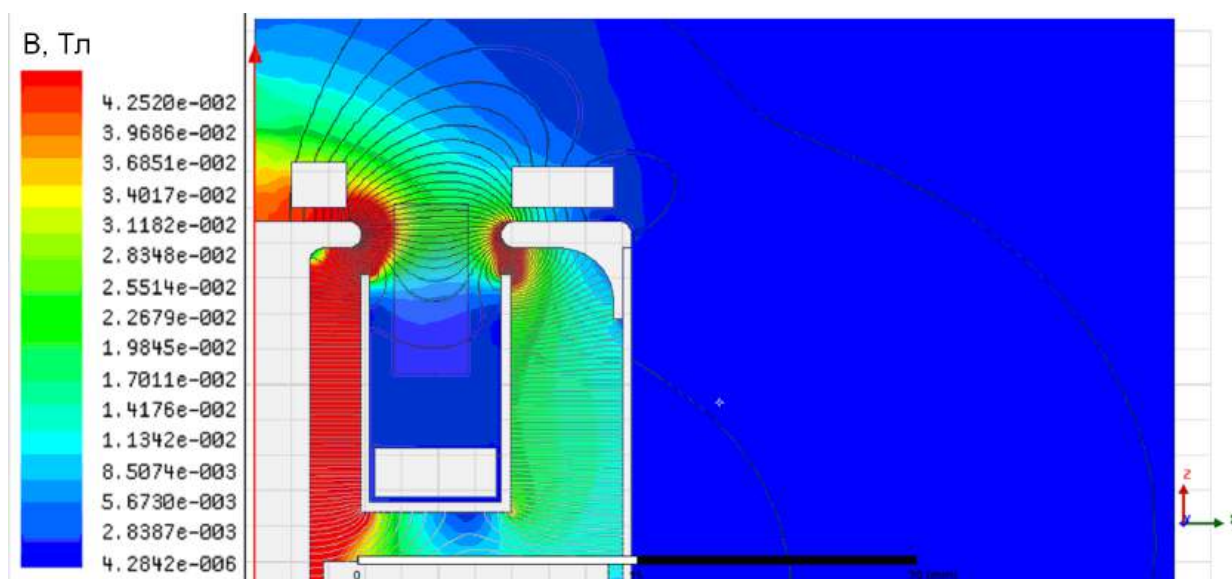


Рисунок 2.22 – Результати розрахунку B для конструкції з подовженим магнітним анодом для варіантів 5 і 6 таблиці 2.1

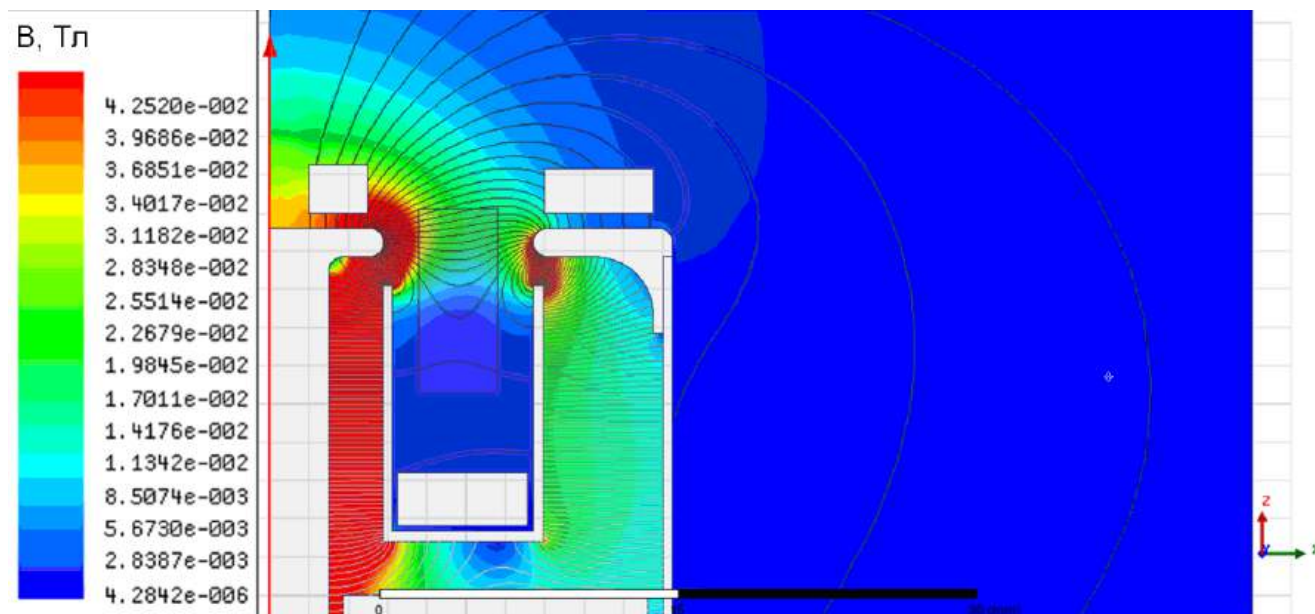


Рисунок 2.23 – Результати розрахунку B для конструкції з подовженим магнітним анодом, котушка в аноді

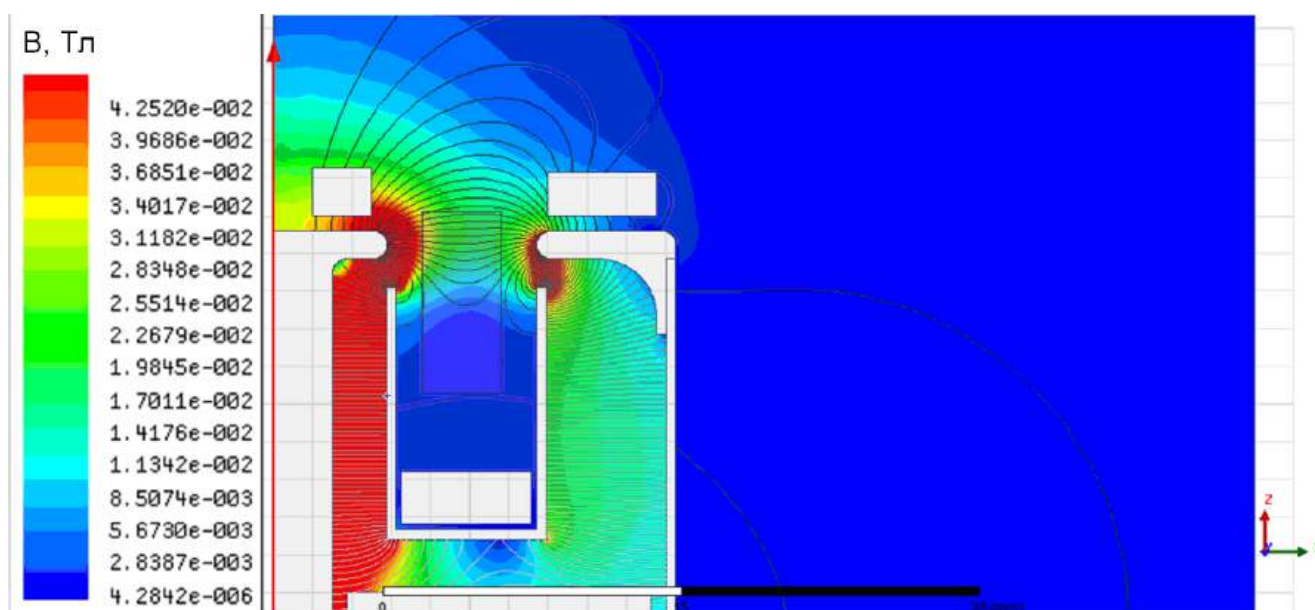


Рисунок 2.24 – Результати розрахунку B для конструкції з подовженим магнітним анодом для варіантів 7 і 9 таблиці 2.1

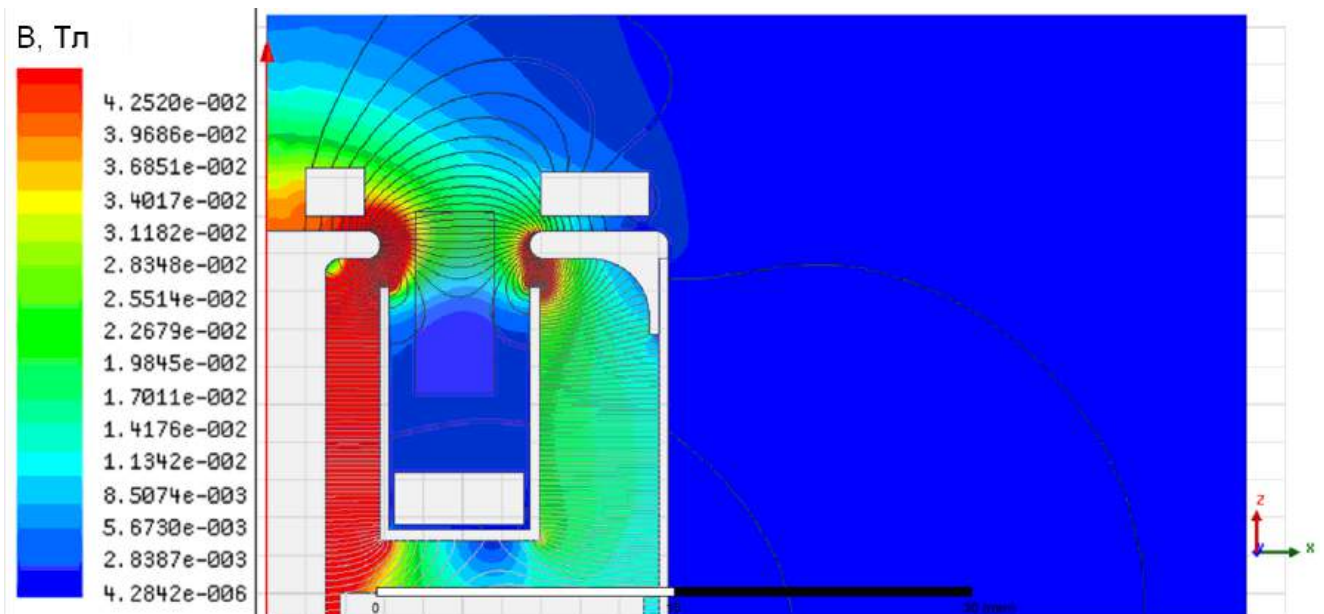


Рисунок 2.25 – Результати розрахунку B для конструкції з подовженим магнітним анодом для варіантів 6, 7 і 9 таблиці 2.1

На рисунку 2.26 показано розподіл індукції магнітного поля уздовж середини РК.

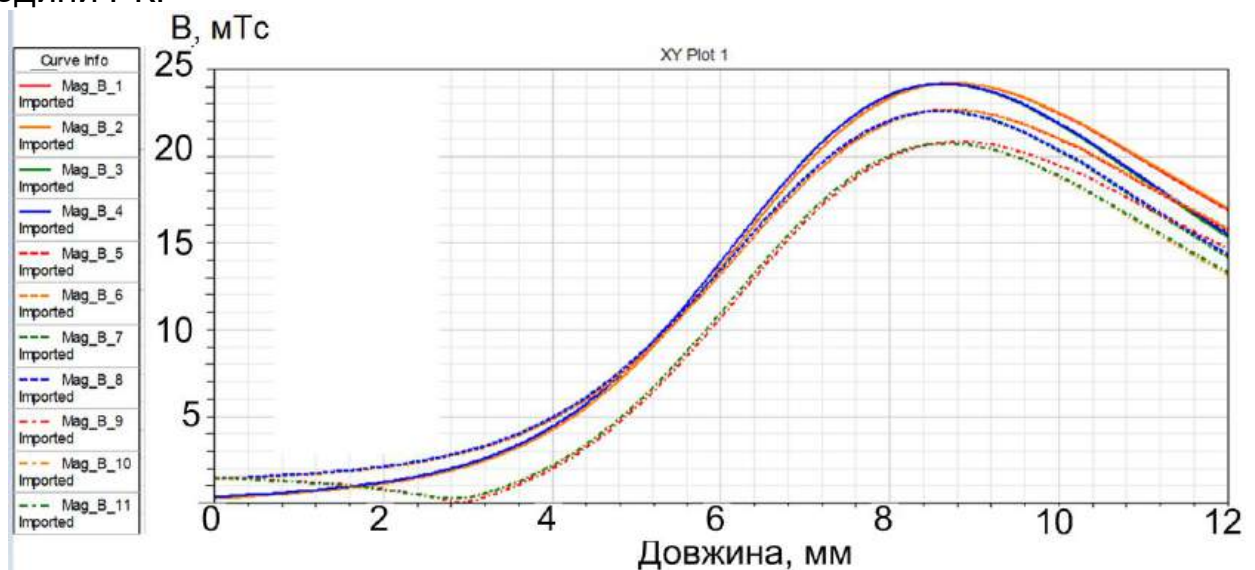


Рисунок 2.26 – Розподіл індукції магнітного поля уздовж середини РК

У результаті моделювання було відзначено:

- максимум МП знаходиться всередині РК (приблизно 1 мм від зрізу, глибина РК – 9,6 мм);
- котушка перед сердечником має незначний вплив на розподіл МП;
- котушка перед зовнішнім полюсом змінює конфігурацію силових ліній, наближаючи їх до «магнітної лінзи»;

– збільшення довжини анода призводить до збільшення МП усередині анода і зниження на зрізі, проте дозволяє розмістити всередині нього додаткову котушку;

– котушка всередині анода дозволяє отримати точніше поле з нульовим (зворотним) значенням МП усередині анода, проте знижує МП на зрізі.

Було наголошено на необхідності дослідження розподілу градієнта, отримання більшої симетричності МСЛ щодо середини РК, можливості зробити поле полюсів і котушок більш вигнутим за рахунок їх зміни.

2.1.5 Зміна конфігурації центрального полюса

Для поліпшення симетричності МП щодо середини РК було прийнято рішення зменшити діаметр внутрішнього полюса, що має знизити значення МП біля внутрішньої стінки РК. У таблиці 2.2 наведено значення змінних параметрів.

Таблиця 2.2 – Розміри внутрішнього полюса

№ п/п	Діаметр внутрішнього полюса, мм	Радіус заокруглення, мм
1	11,6	0
2	11,6	0,7
3	10	0,7
4	8,6	0,7
5	7,6	0,7
6	3	0,7

На рисунку 2.27 показано лінії, уздовж яких досліджувався розподіл МП у РК (по осі і по радіусу).

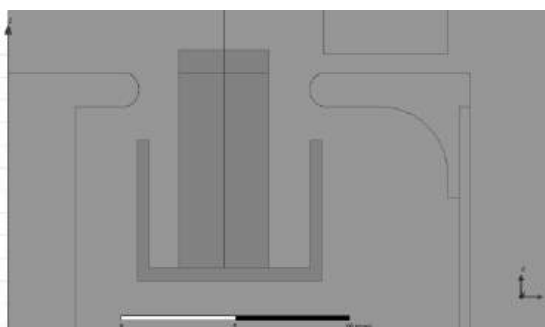


Рисунок 2.27 – Лінії інтегрування

Грунтуючись на результатах попереднього етапу досліджень, було прийнято рішення розташувати додаткову котушку намагнічування напроти зовнішнього полюса.

Моделювання для варіантів, наведених у таблиці 2.2, проводилося як з додатковою котушкою, так і без неї. Графічне відображення результатів моделювання показано на рисунках 2.28–2.33.

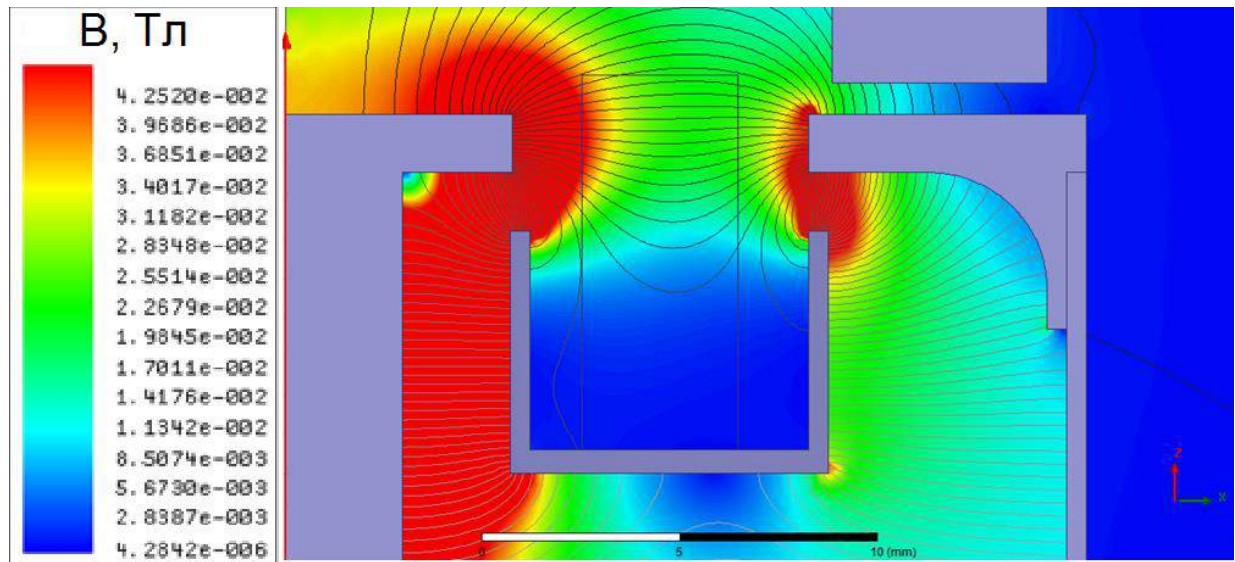
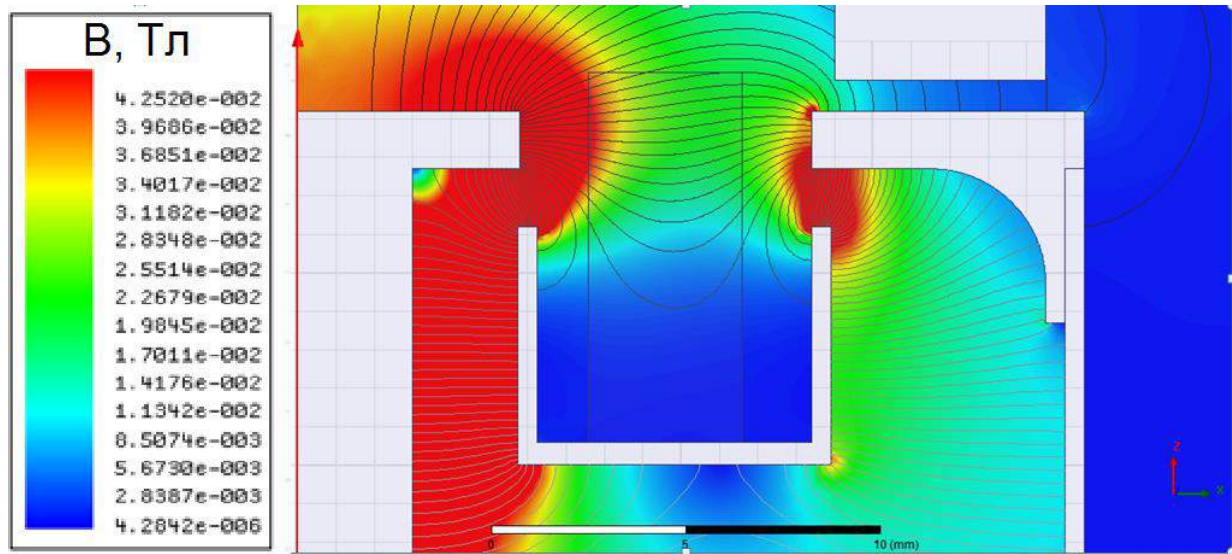
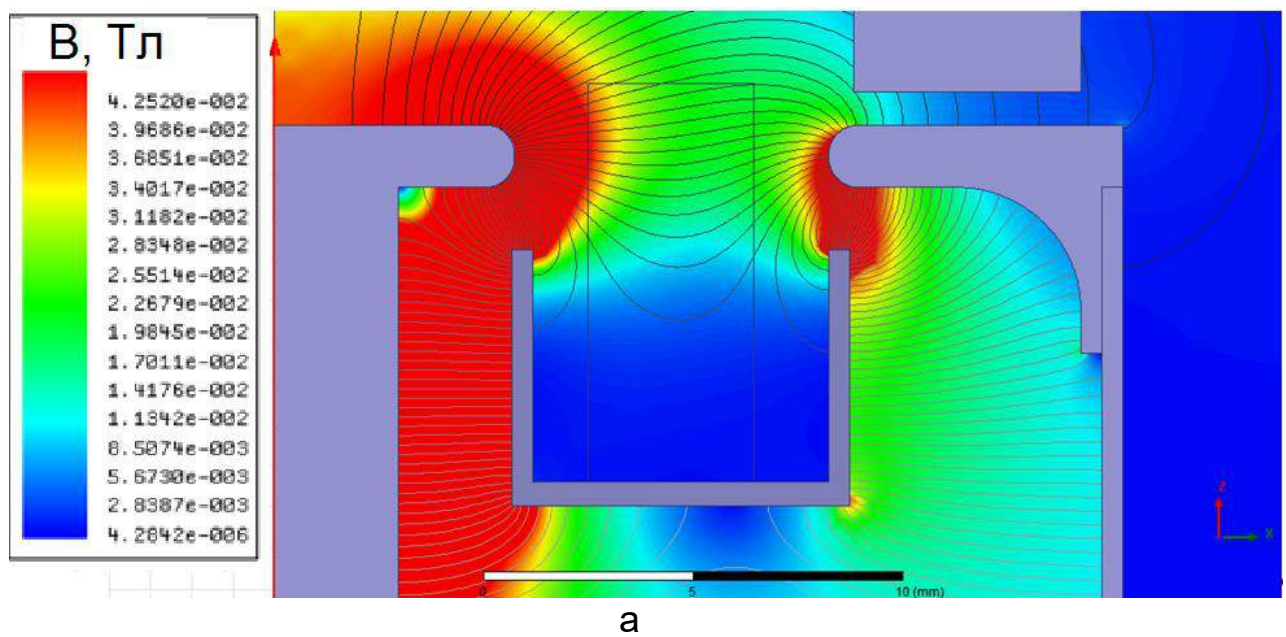
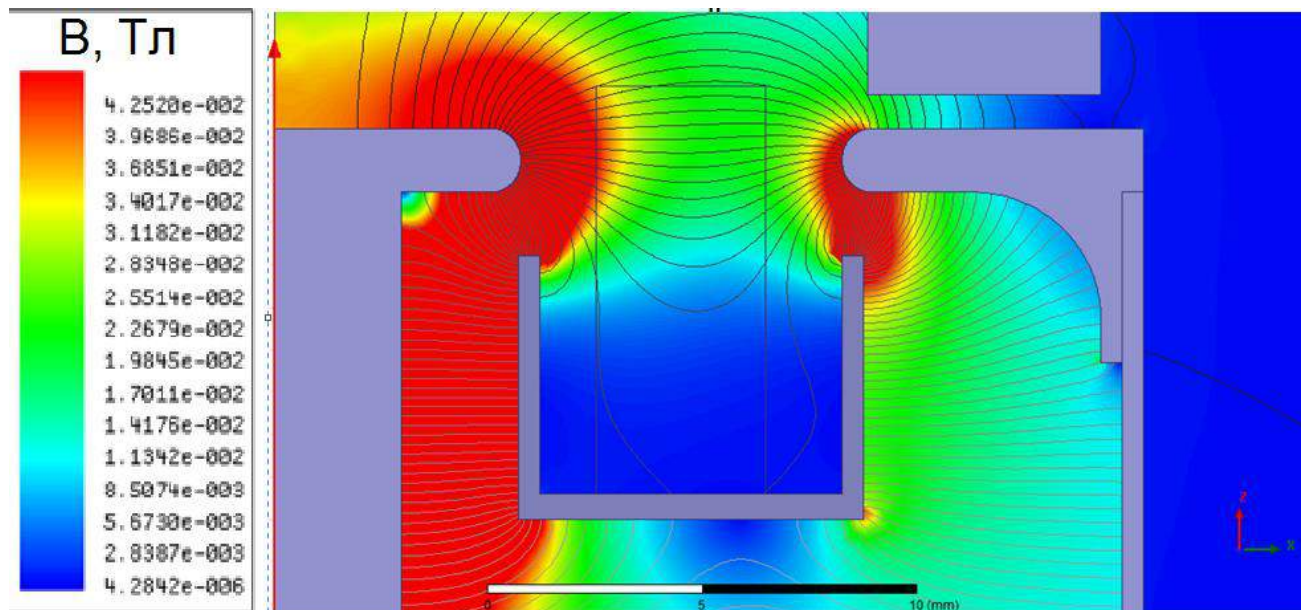


Рисунок 2.28— Результати розрахунків B для конструкції варіанта 1 таблиці 2.2

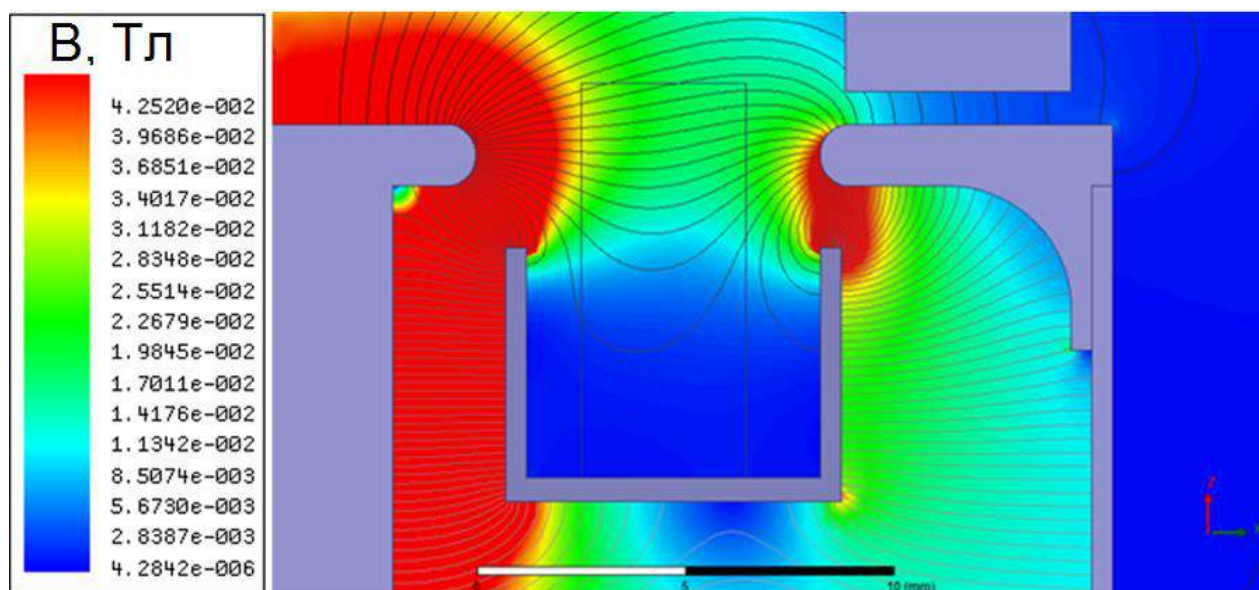


а

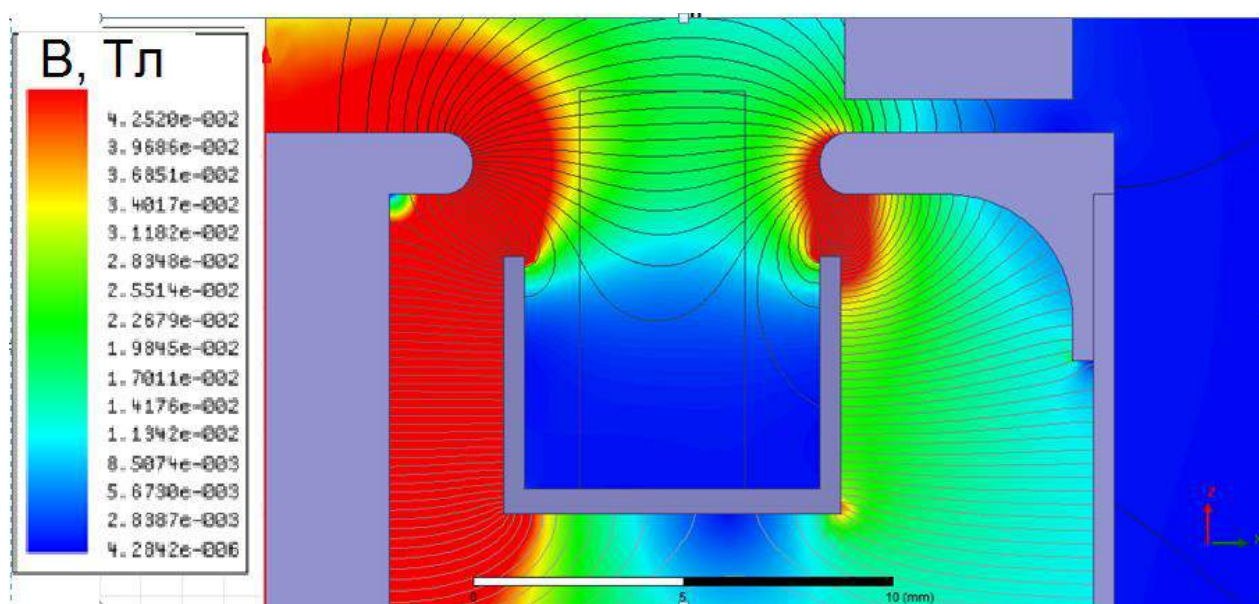


б

Рисунок 2.29— Результати розрахунків B для конструкції варіанта 2 таблиці 2.2



а



б

Рисунок 2.30 – Результати розрахунків B для конструкції варіанта 3 таблиці 2.2

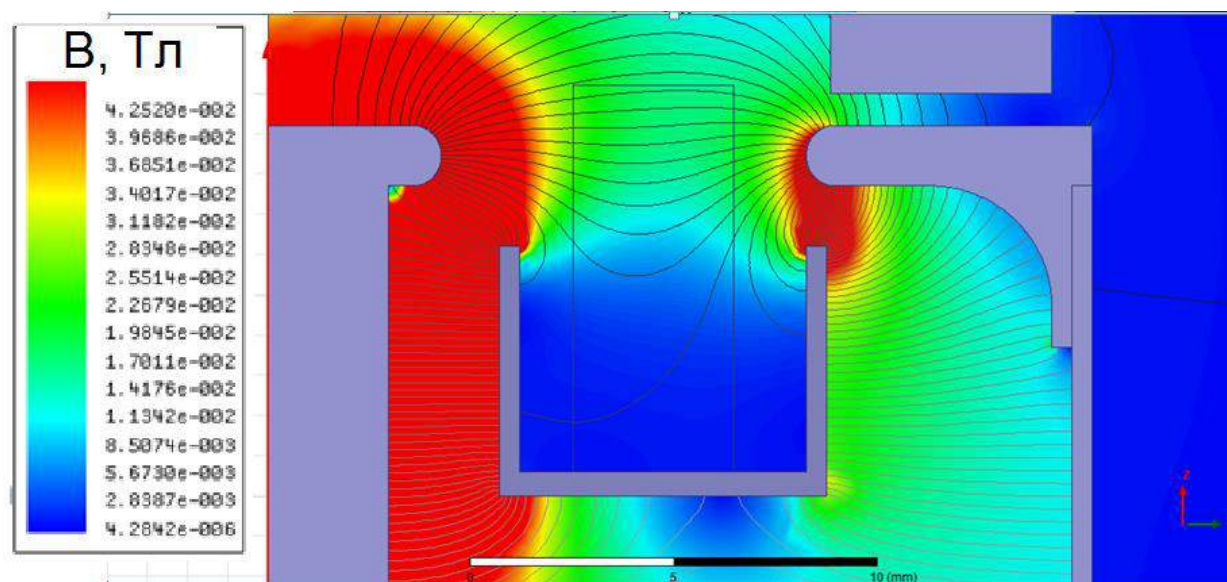
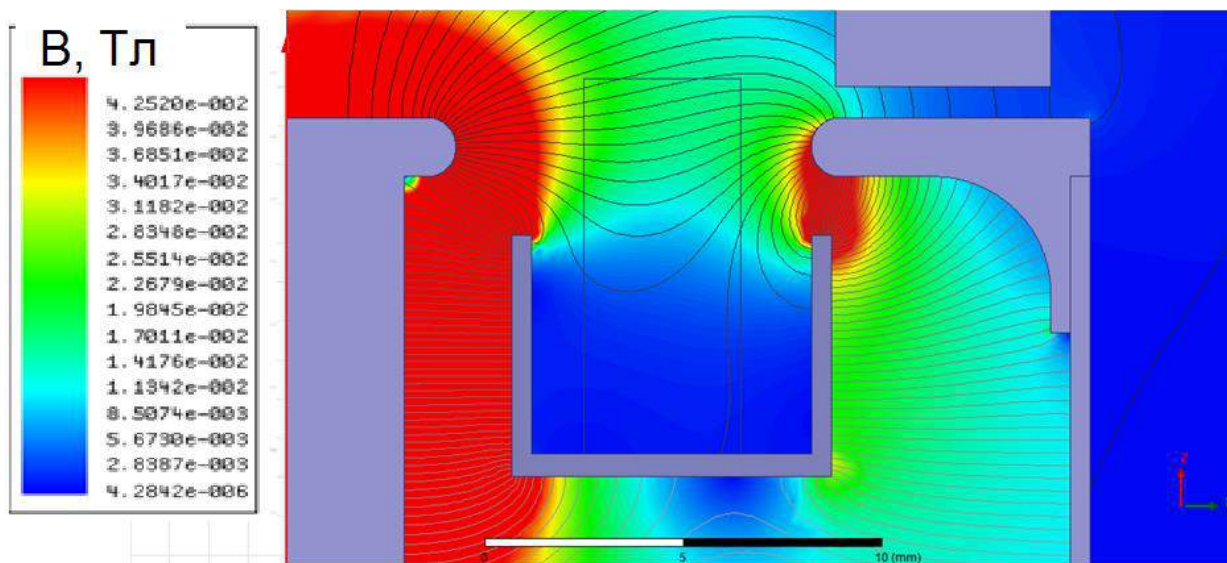


Рисунок 2.31 – Результати розрахунків B для конструкції варіанта 4 таблиці 2.2

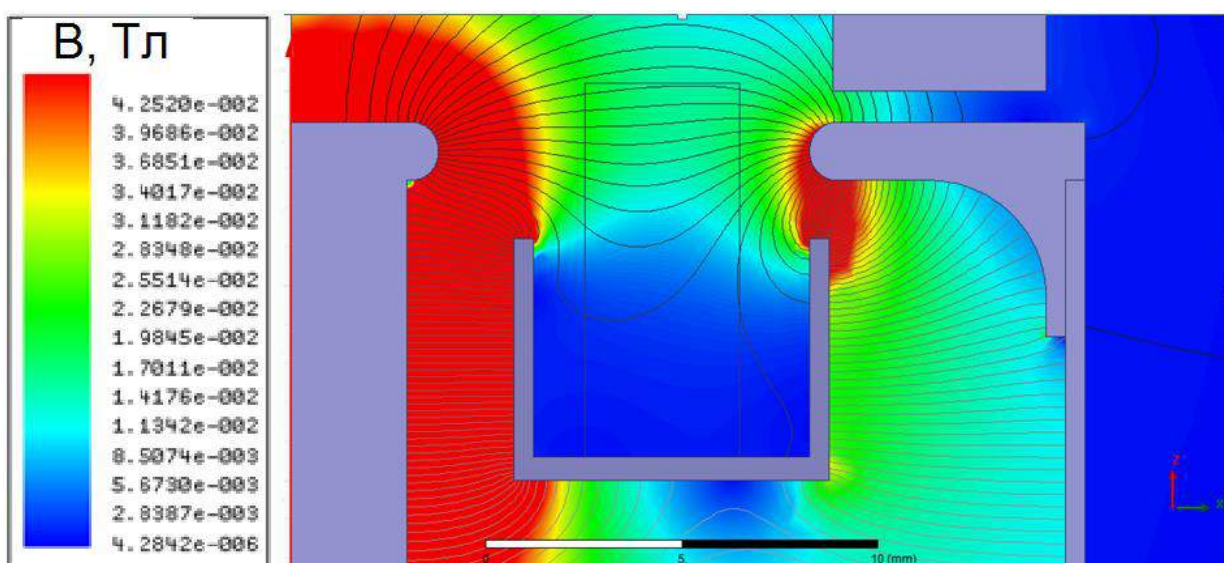
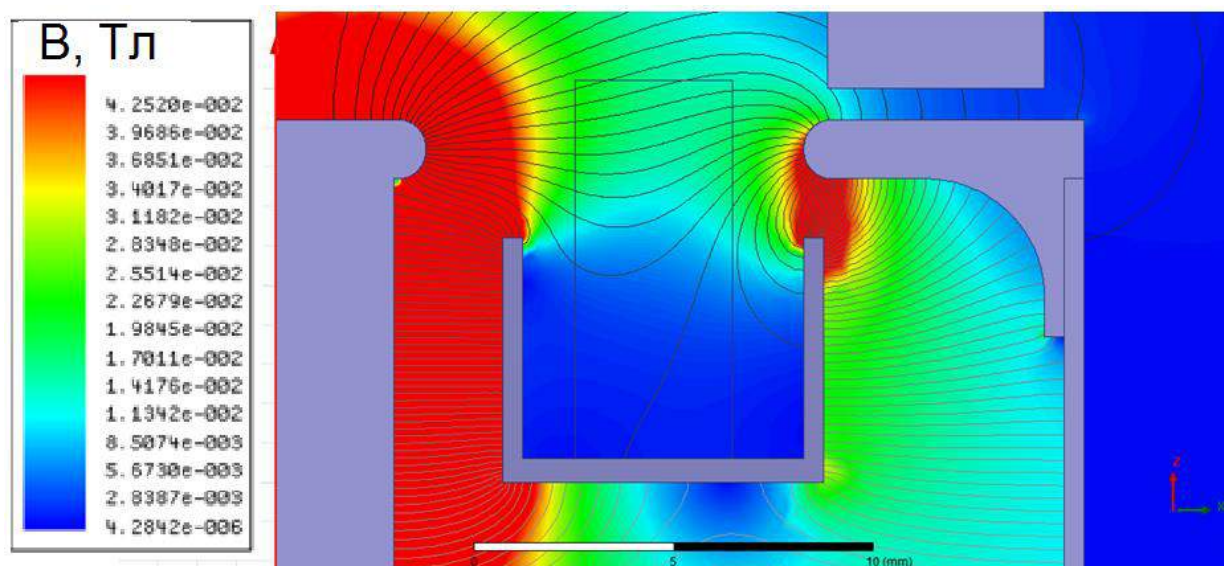
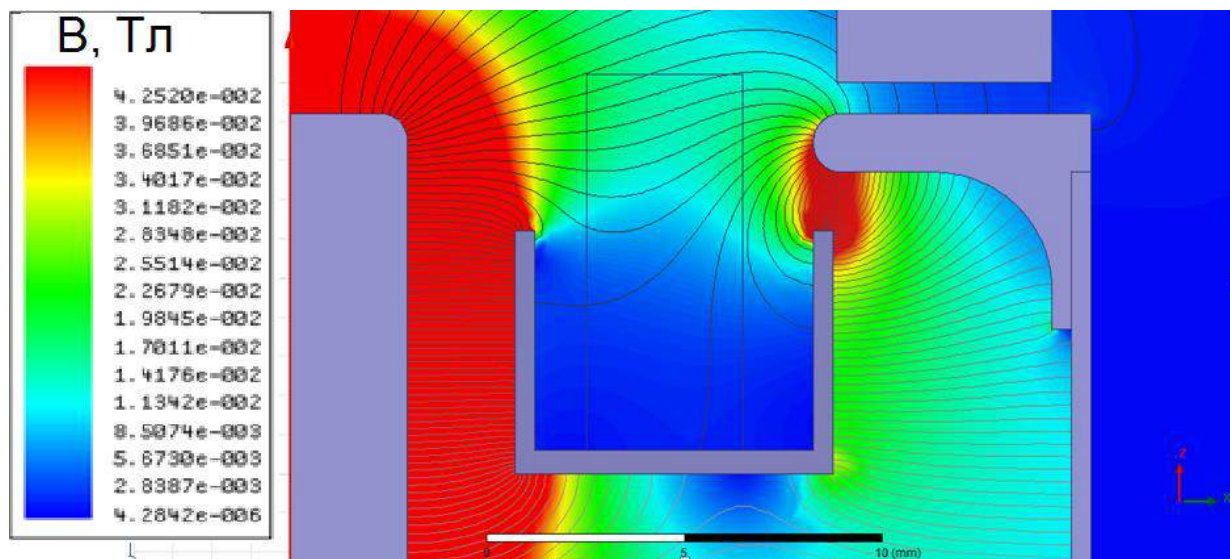
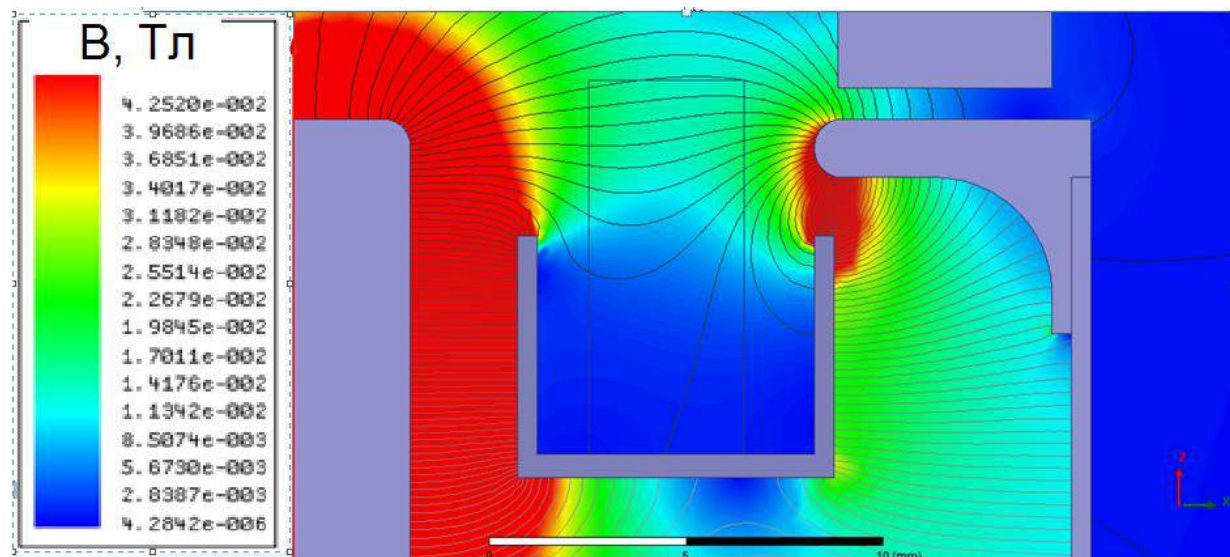


Рисунок 2.32 – Результати розрахунків B для конструкції варіанта 5 таблиці 2.2



а



б

Рисунок 2.33 – Результати розрахунків B для конструкції варіанта 6 таблиці 2.2

На рисунках 2.34–2.39 показано розподіл уздовж указаних вище ліній інтегрування.

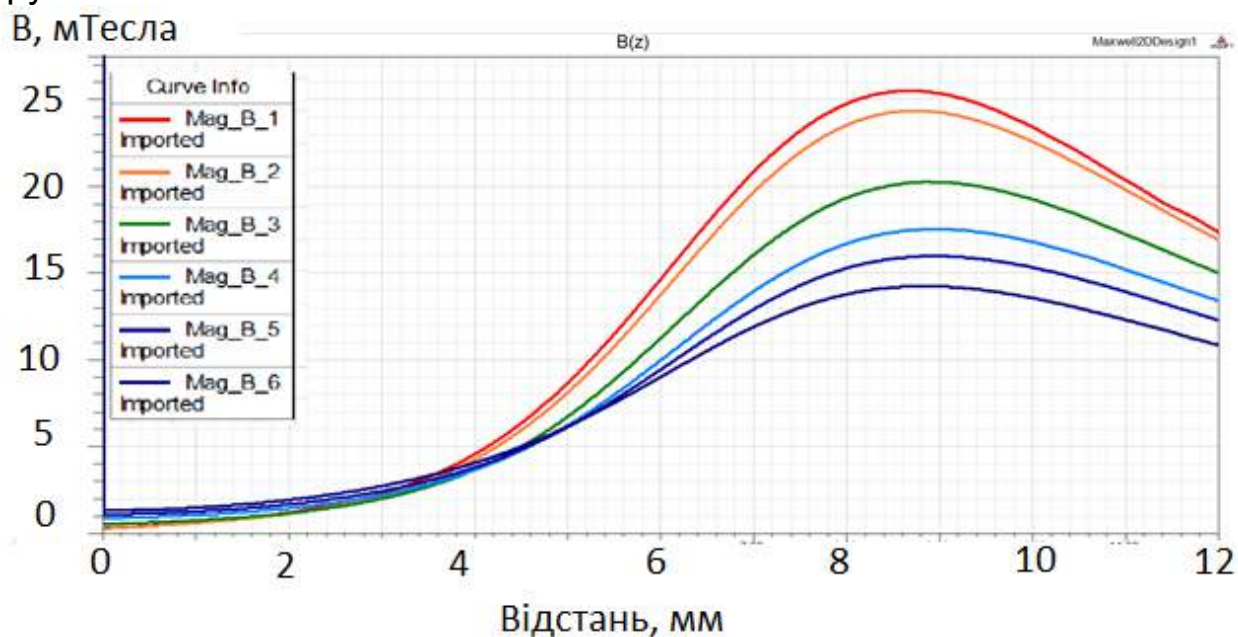


Рисунок 2.34 – Розподіл індукції МП уздовж серединної лінії РК (без додаткової котушки)

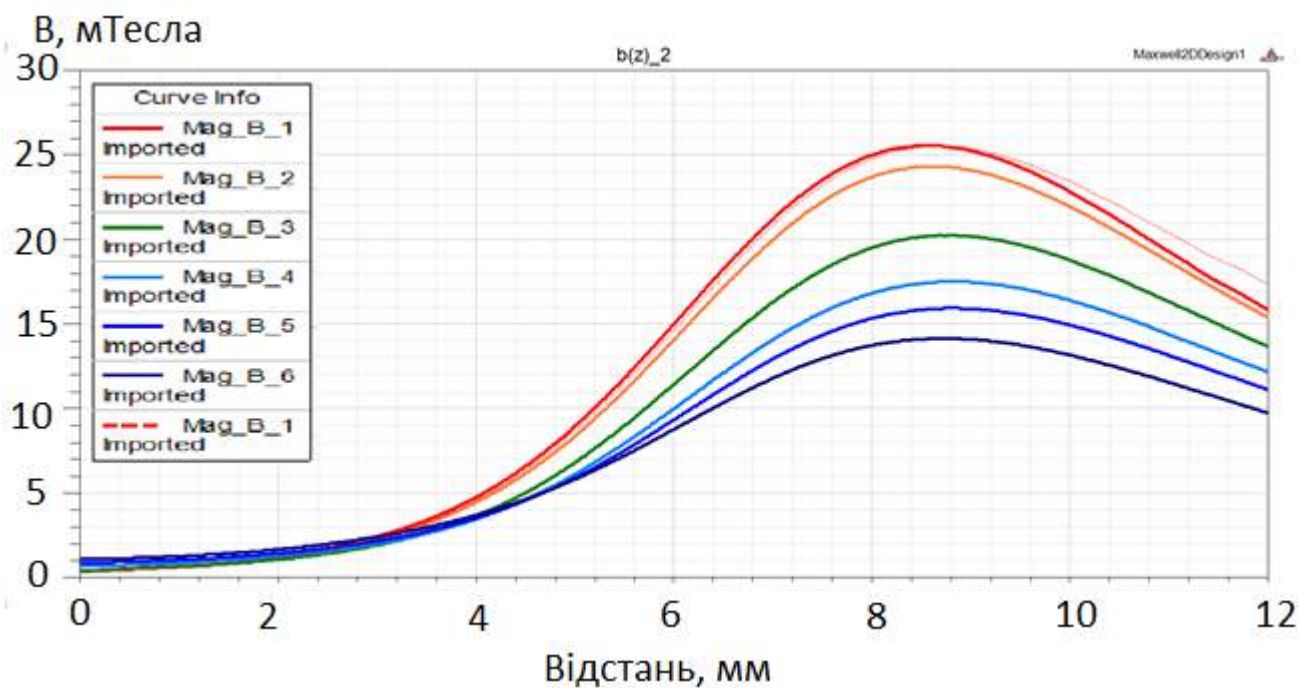


Рисунок 2.35 – Розподіл індукції МП уздовж серединної лінії РК (з додатковою котушкою)

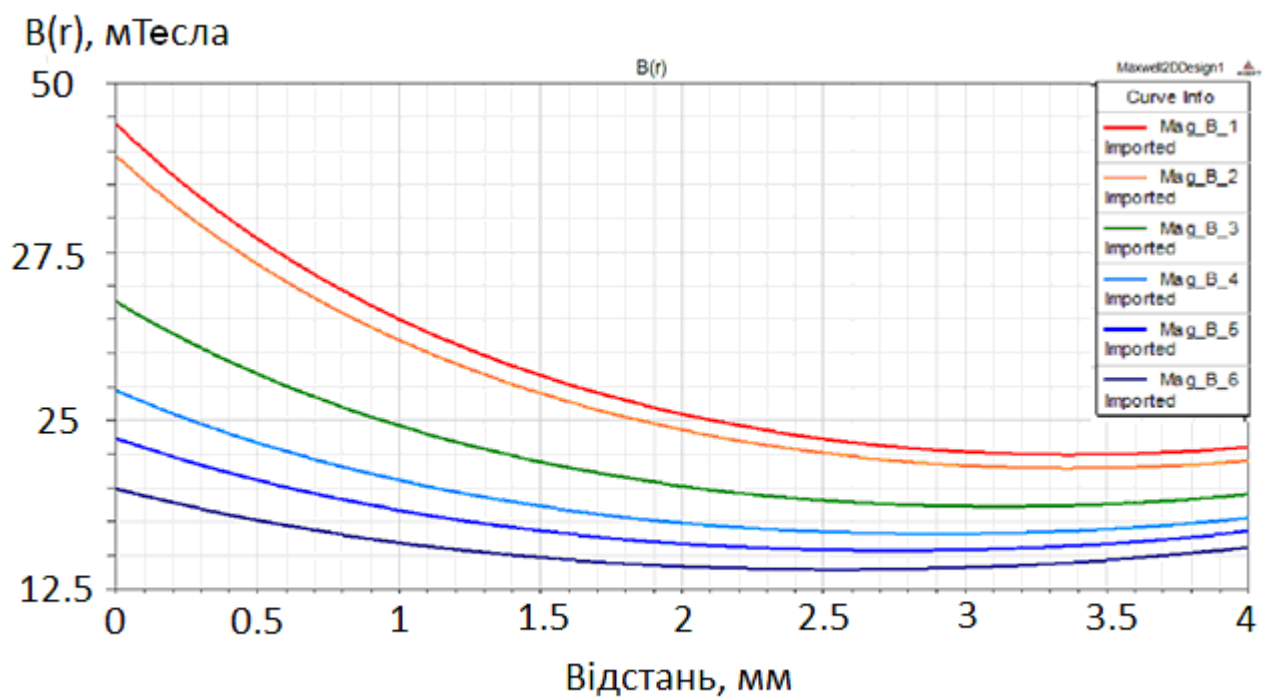


Рисунок 2.36 – Розподіл у РК по зрізу магнітних полюсів (без додаткової котушки)

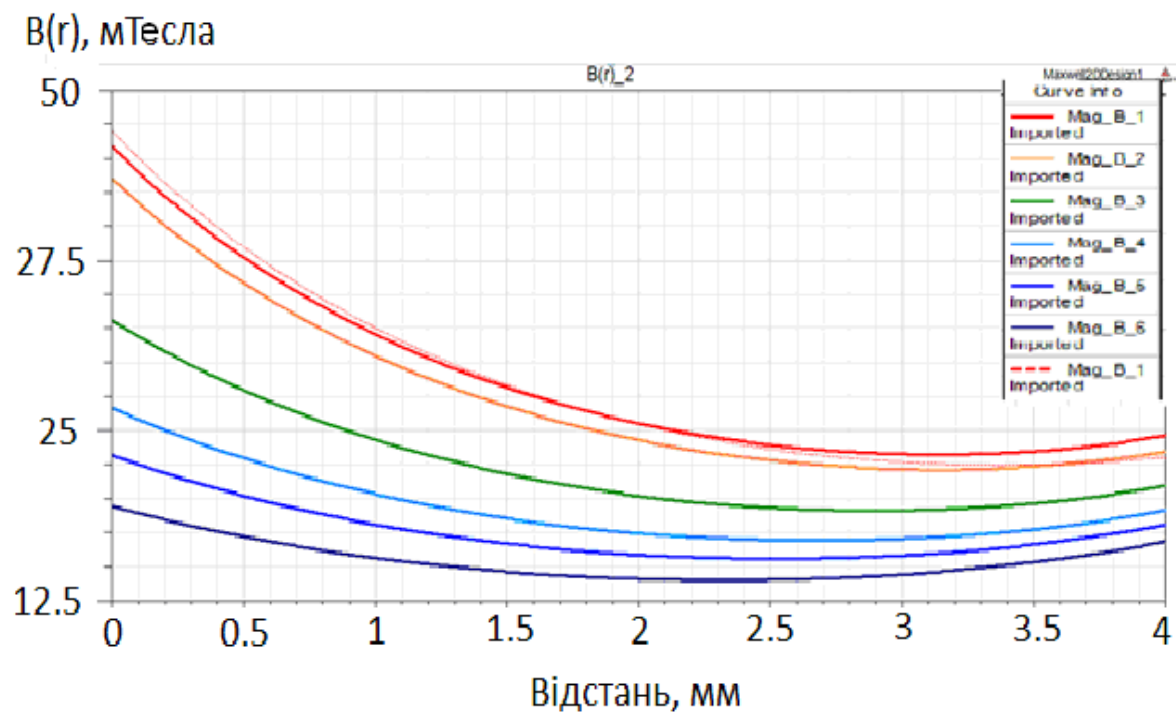


Рисунок 2.37 – Розподіл в РК по зрізу магнітних полюсів (з додатковою котушкою)

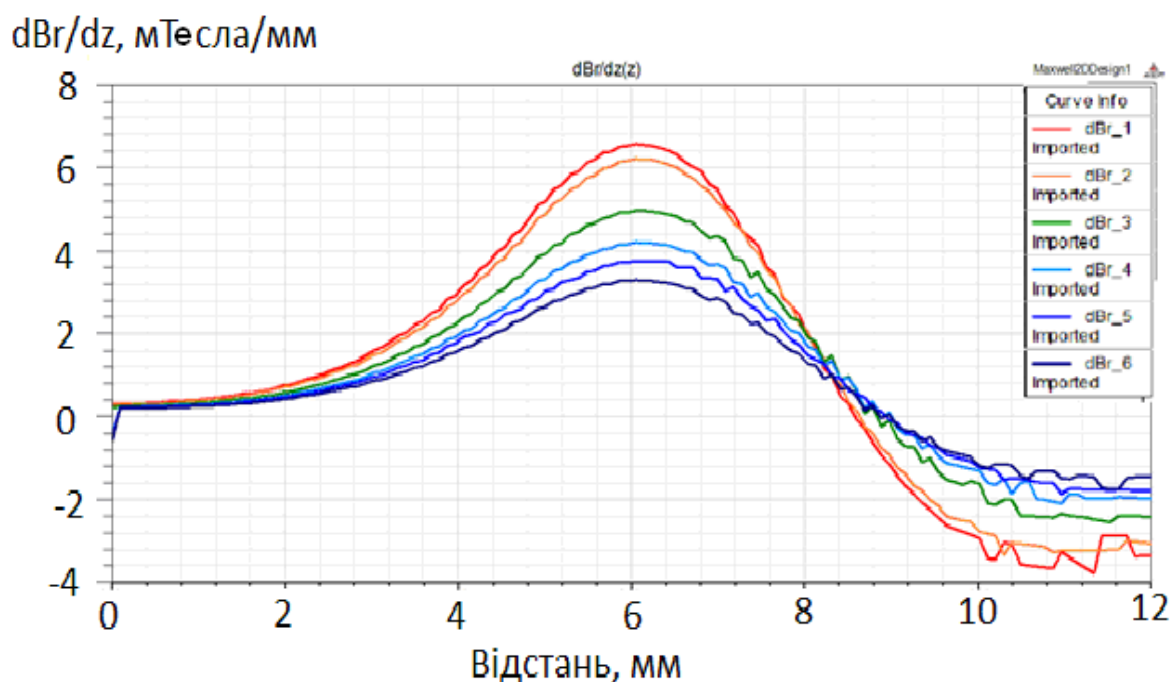


Рисунок 2.38 – Розподіл градієнта по серединній лінії РК (без додаткової котушки)

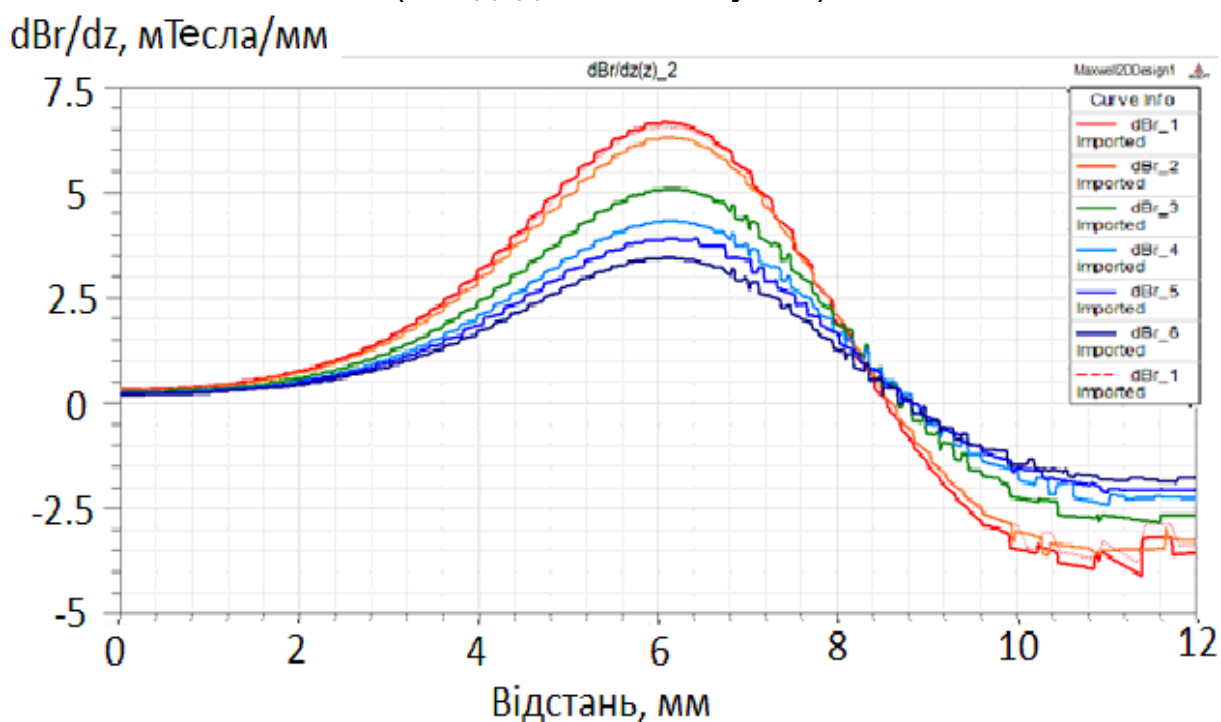


Рисунок 2.39 – Розподіл градієнта по серединній лінії РК з додатковою зовнішньою котушкою

У результаті моделювання було відзначено, що зменшення діаметра центрального полюса призводить до: зниження величини МП у РК; зниження градієнта МП уздовж РК; вирівнювання величини МП по радіусу; викривлення магнітних силових ліній (МСЛ) до осі двигуна.

Застосування зовнішньої котушки намагнічування призводить до таких результатів: незначних знижень величини МП; зниження радіального градієнта МП; незначної зміни градієнта; меншої асиметричності МСЛ щодо серединної лінії РК.

Можливі напрямки подальших досліджень: зміна товщини полюсів; зміна геометрії полюсів; варіювання конфігурації і густини струму зовнішньої котушки.

Розглянемо останній пункт як на найбільш перспективний.

2.1.6 Збільшення густини струму і розміру зовнішньої додаткової котушки

Для дослідження впливу зовнішньої котушки на розподіл МП було прийнято рішення варіювати густиною струму для двох типорозмірів котушки, варіанти розрахунків наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Варіанти розрахунків

№ п/п	Густина струму в додатковій котушці, А/мм ²	Котушка великих розмірів
1	0	0
2	2,5	2,5
3	5	5
4	7,5	7,5

Геометричні конфігурації розрахункових моделей показано на рисунку 2.40.



Рисунок 2.40 – Геометрична конфігурація розрахункової моделі:
а – базова; б – зовнішня котушка збільшена

Графічне відображення результатів моделювання показано на рисунках 2.41 – 2.45.

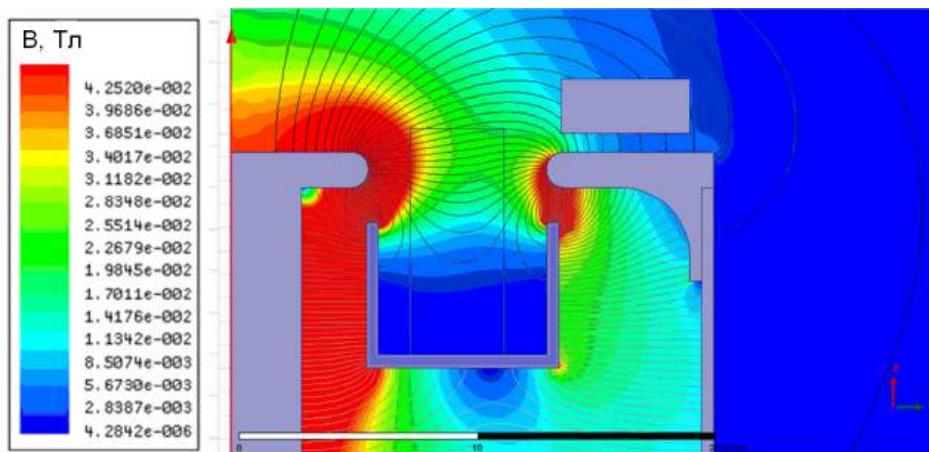
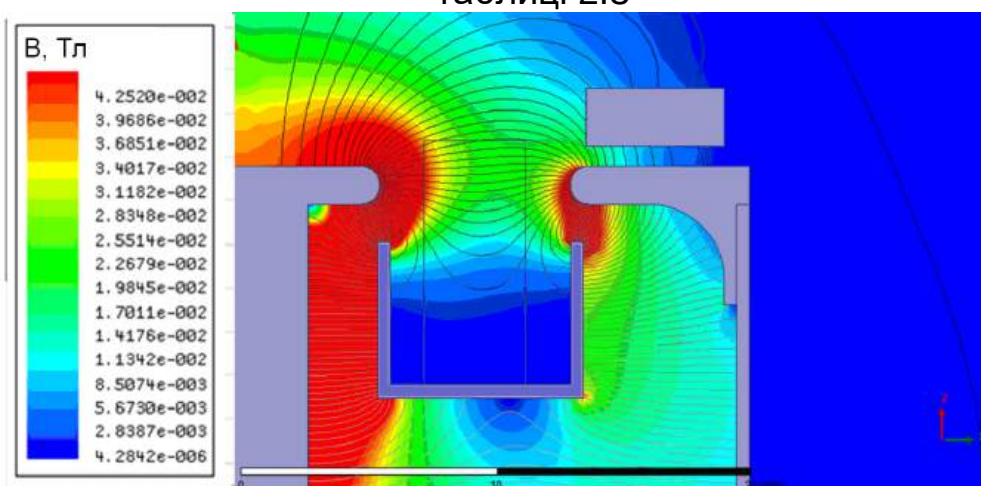
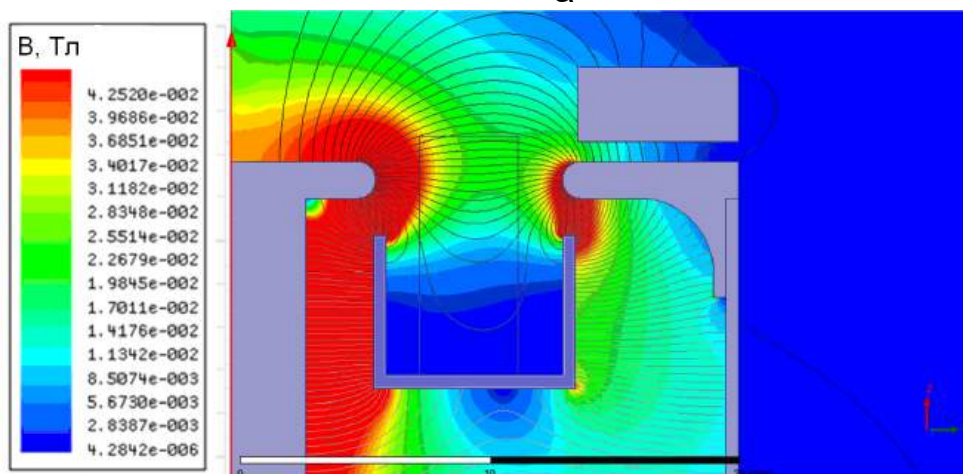


Рисунок 2.41 – Результати розрахунків конструкції виконання 1 таблиці 2.3

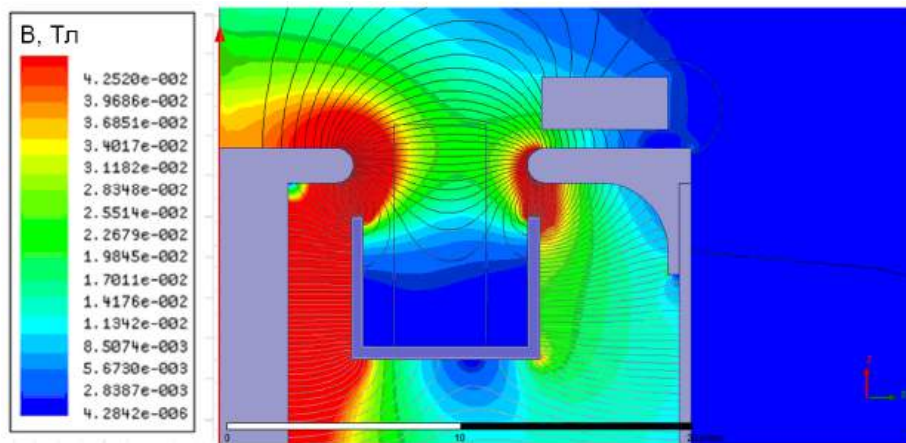


а

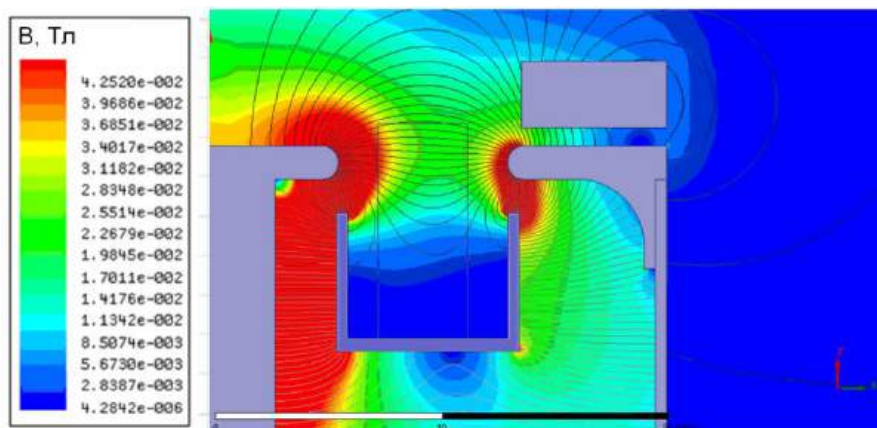


б

Рисунок 2.42 – Результати розрахунків конструкції варіанта 1 таблиці 2.3

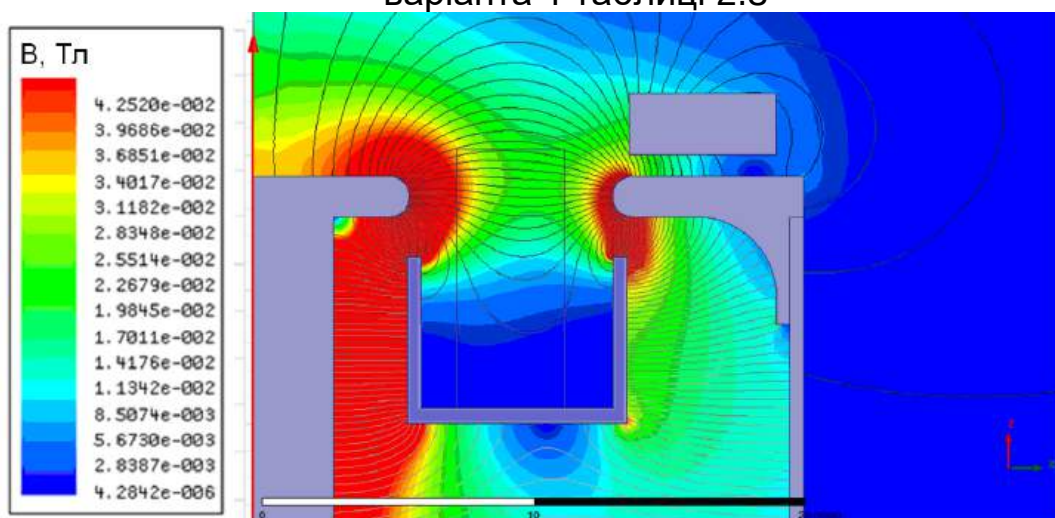


а



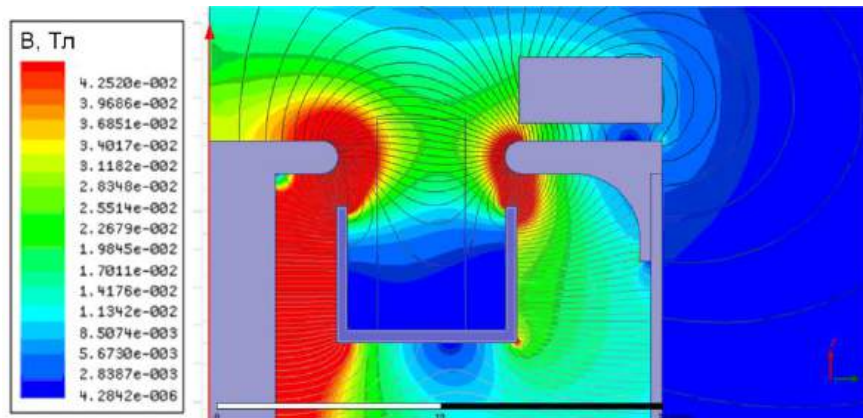
б

Рисунок 2.43 – Результаты расчетов конструкции
варианта 1 таблицы 2.3



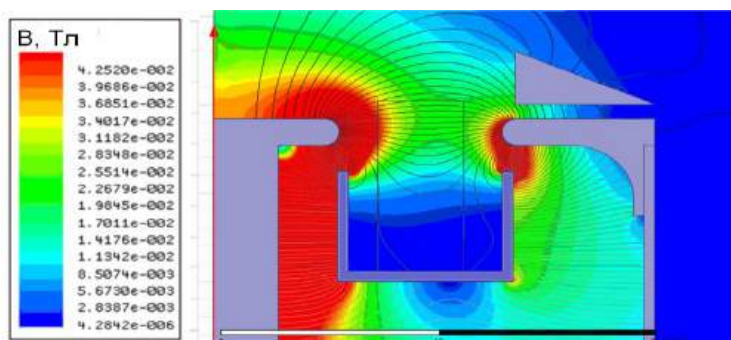
а

Рисунок 2.44 – Результаты расчетов конструкции
варианта 2 таблицы 2.3

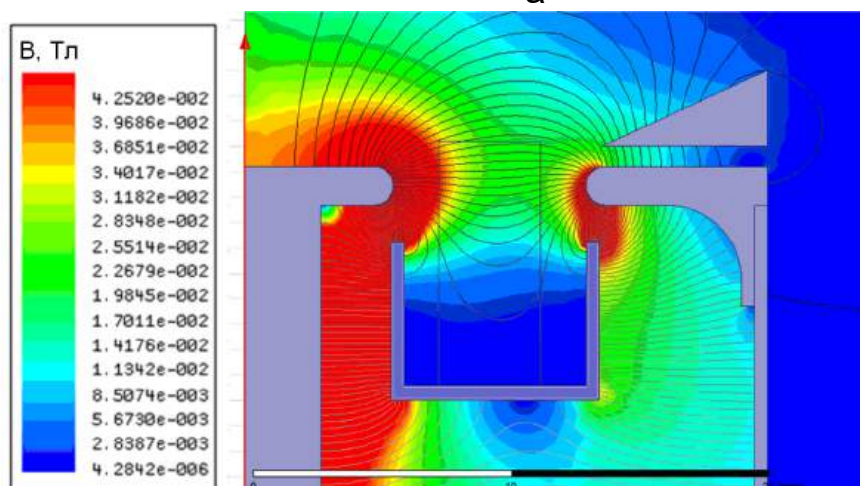


б

Рисунок 2.44 – Закінчення



а



б

Рисунок 2.45 – Результати розрахунків конструкції
варіанта 3 таблиці 2.3

На рисунках 2.46–2.51 показано розподіл уздовж указаних вище ліній інтегрування.

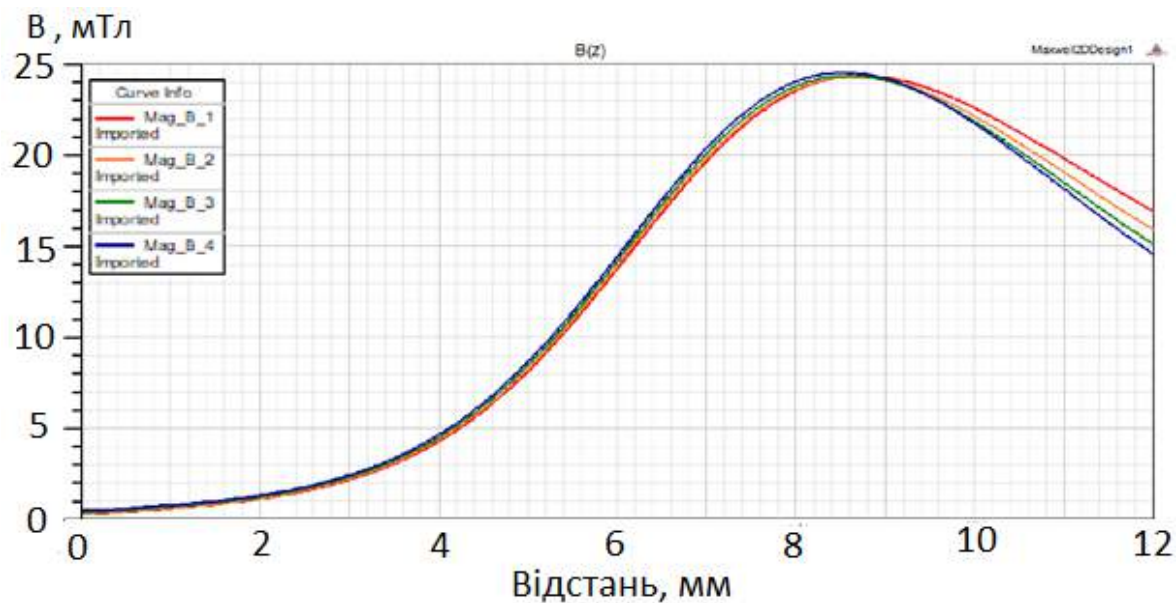


Рисунок 2.46 – Розподіл B уздовж серединної лінії РК

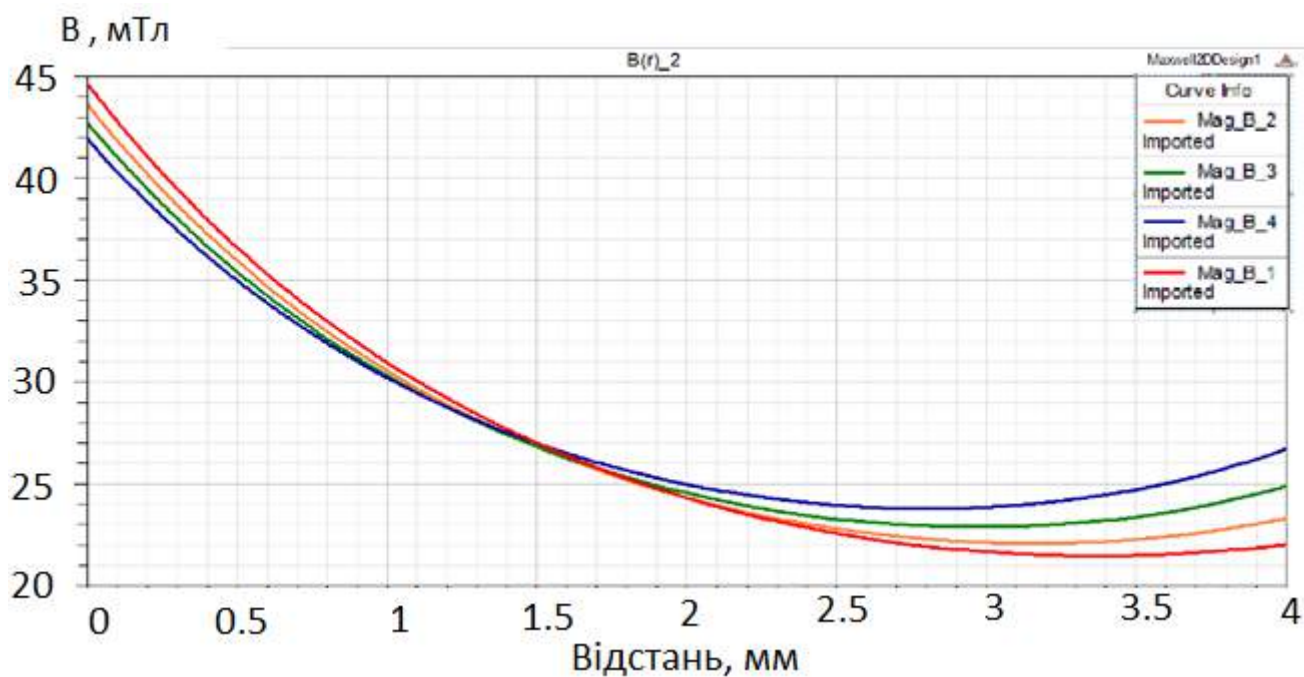


Рисунок 2.47 – Розподіл B уздовж серединної лінії РК
(з більшою зовнішньою котушкою)

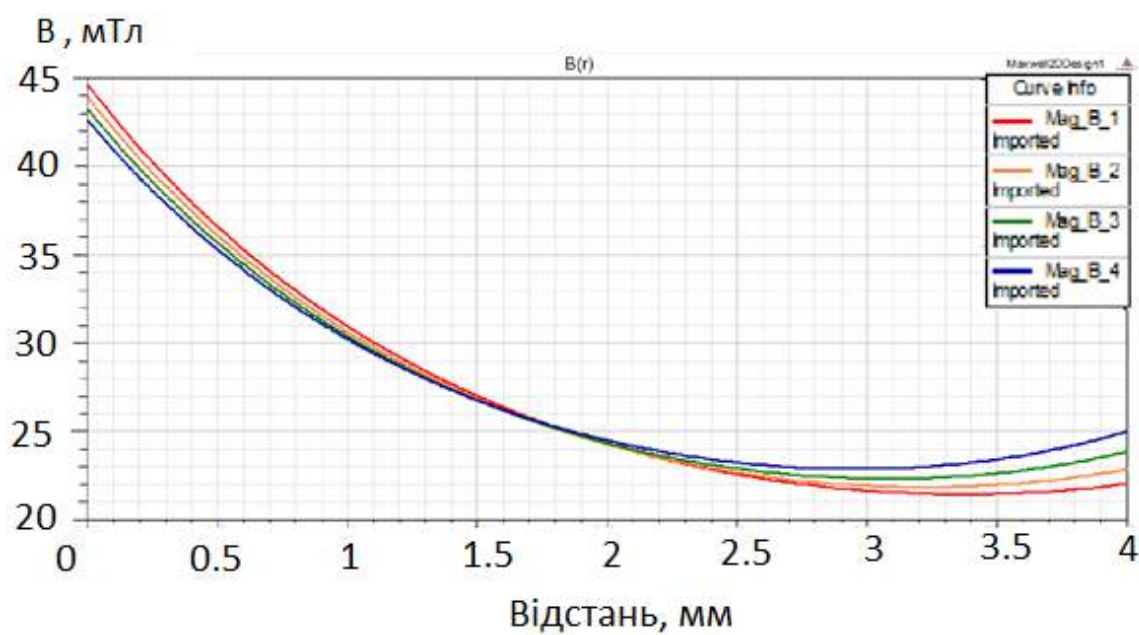


Рисунок 2.48 – Розподіл B у РК по зрізу магнітних полюсів

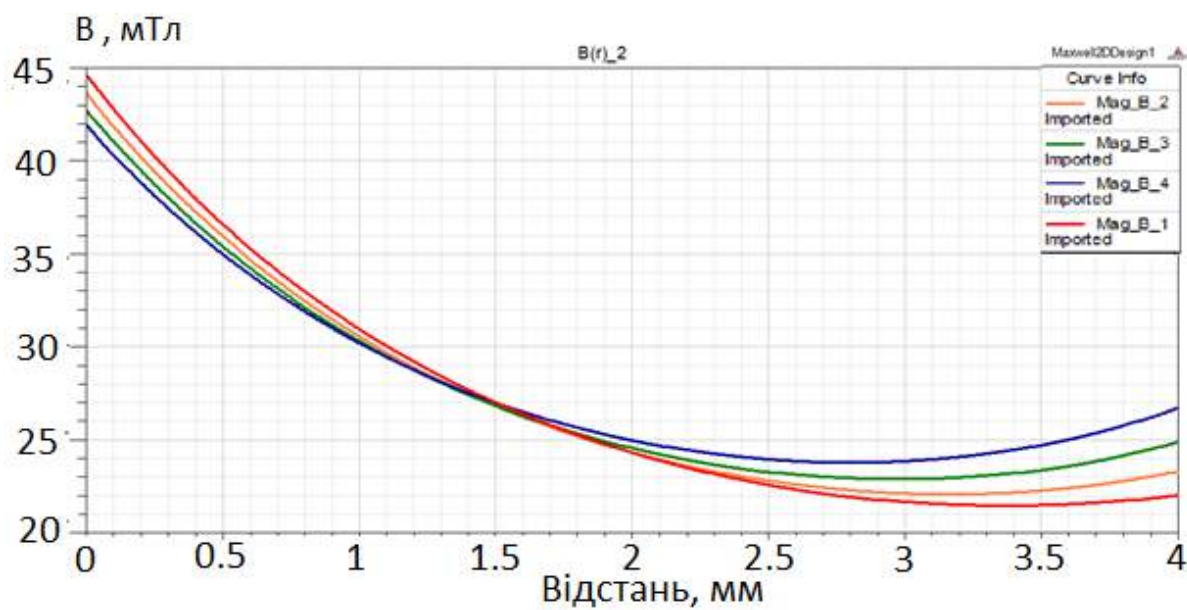


Рисунок 2.49 – Розподіл B у РК по зрізу магнітних полюсів (з більшою зовнішньою котушкою)

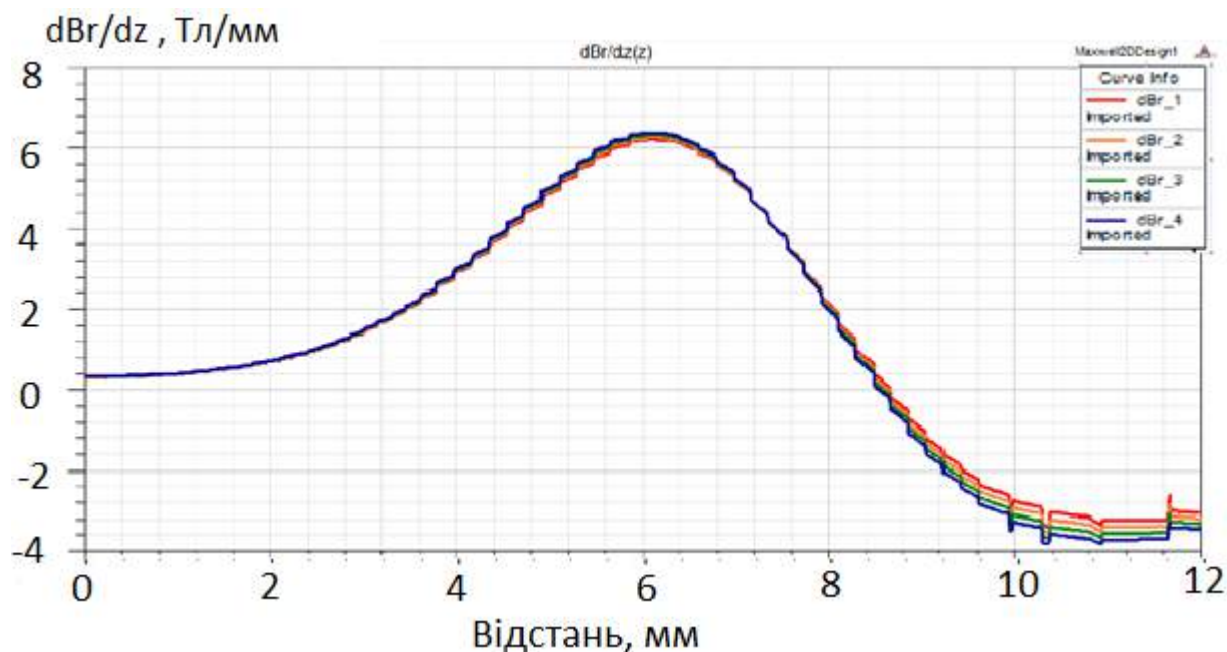


Рисунок 2.50 – Розподіл градієнта $\frac{dB}{dz}$ по серединній лінії РК

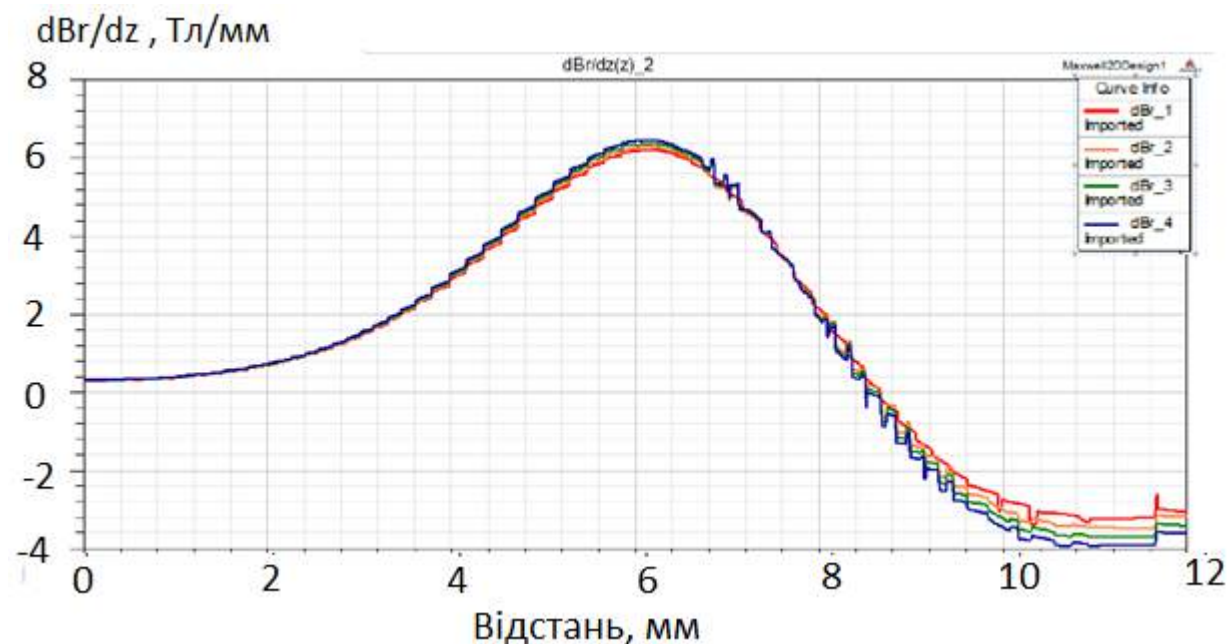


Рисунок 2.51 – Розподіл градієнта $\frac{dB}{dz}$ по серединній лінії РК
(з більшою зовнішньою котушкою)

У результаті моделювання було відзначено, що збільшення густини струму або розміру зовнішньої додаткової котушки призводить до: збільшення величини індукції МП на серединній лінії РК; зниження градієнта МП по радіусу РК; незначного збільшення градієнта МП уздовж РК; зміщення максимуму МП усередину РК.

2.1.7 Залежність МП від діаметра сердечника і осьового зазору в магнітному екрані

Як варіант вирівнювання МП по радіусу РК було запропоновано зменшення діаметра сердечника магнітопроводу і застосування осьового зазору в магнітопроводі [13–15]. Варіанти наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Варіанти параметрів розрахунку

№ п/п	Конфігурація
1	Базова
2	Зменшено діаметр сердечника (в області анода)
3	Осьовий зазор у магнітному екрані (анод) – 1,5 мм
4	Осьовий зазор у магнітному екрані (анод) – 0,75 мм
5	Осьовий зазор у магнітному екрані (анод по зовнішньому діаметру) – 1,5 мм
6	Осьовий зазор у магнітному екрані (анод по зовнішньому діаметру) – 0,75 мм

У базовій конфігурації густина струму в додатковій котушці становить 3 А/мм². Графічне відображення показано на рисунках 2.52–2.57.

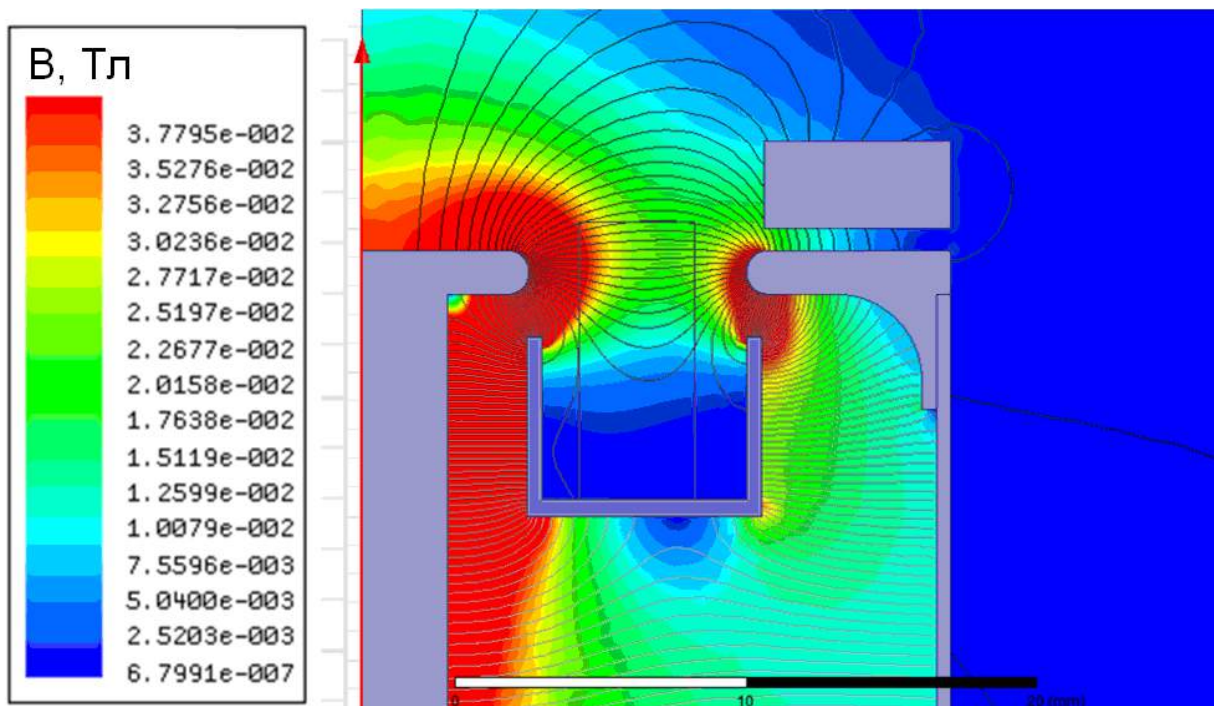
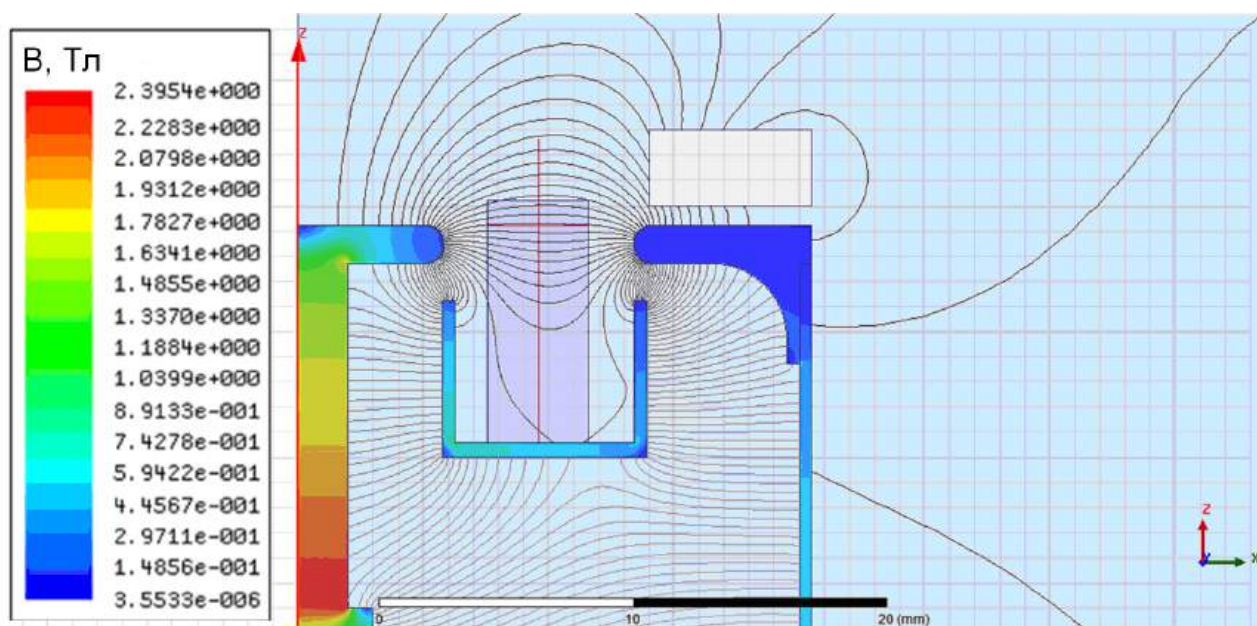


Рисунок 2.52 – Результати розрахунків для конструкції варіанта 1 таблиці 2.4



б

Рисунок 2.53 – Результати розрахунків для конструкції
варіанта 2 таблиці 2.4

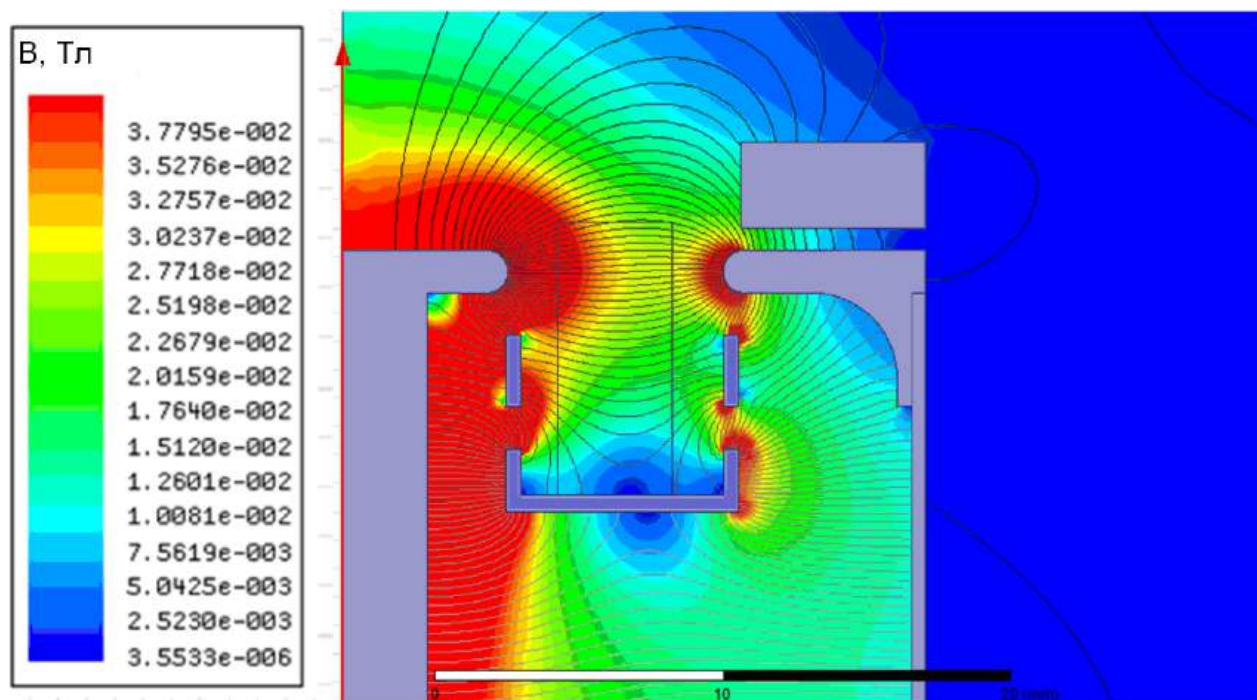


Рисунок 2.54 – Результати розрахунків для конструкції
варіанта 3 таблиці 2.4

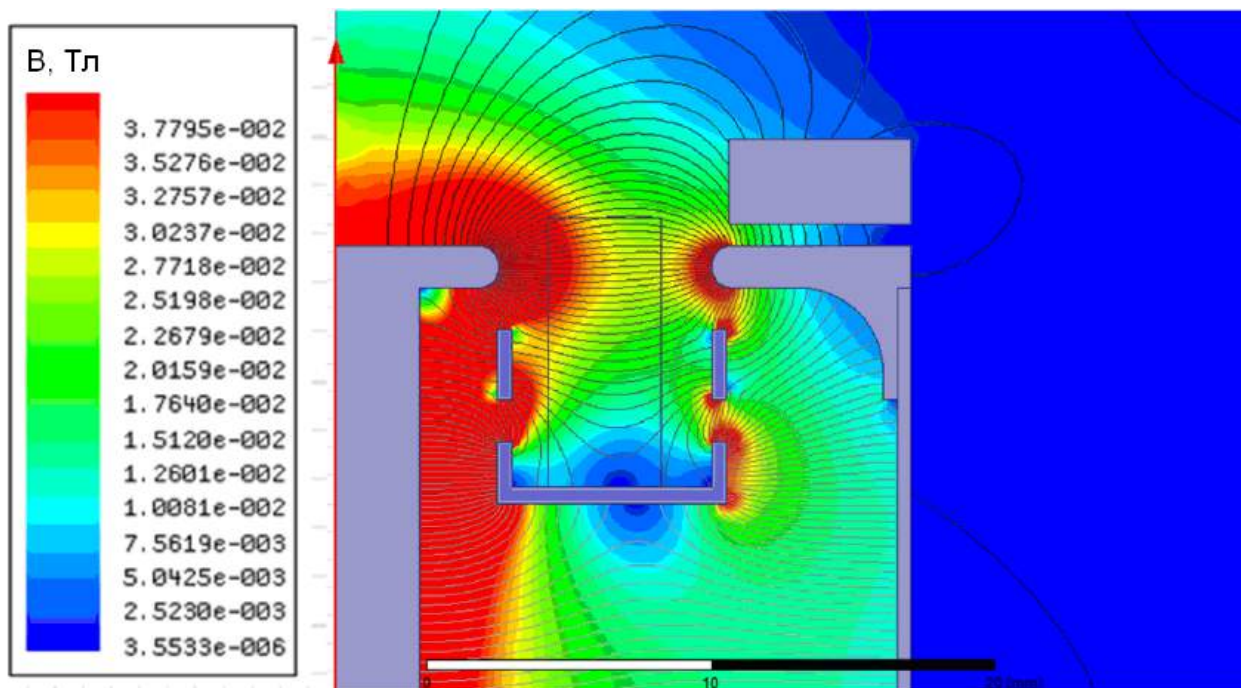


Рисунок 2.55 – Результати розрахунків для конструкції
варіанта 4 таблиці 2.4

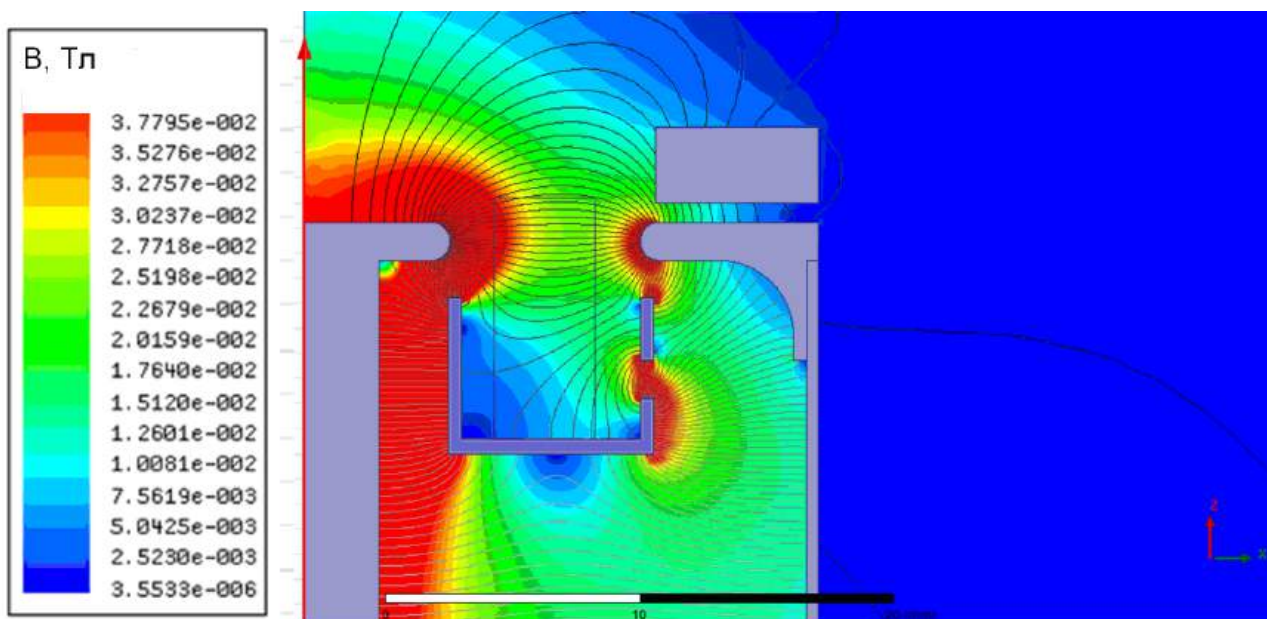


Рисунок 2.56 – Результати розрахунків для конструкції
варіанта 5 таблиці 2.4

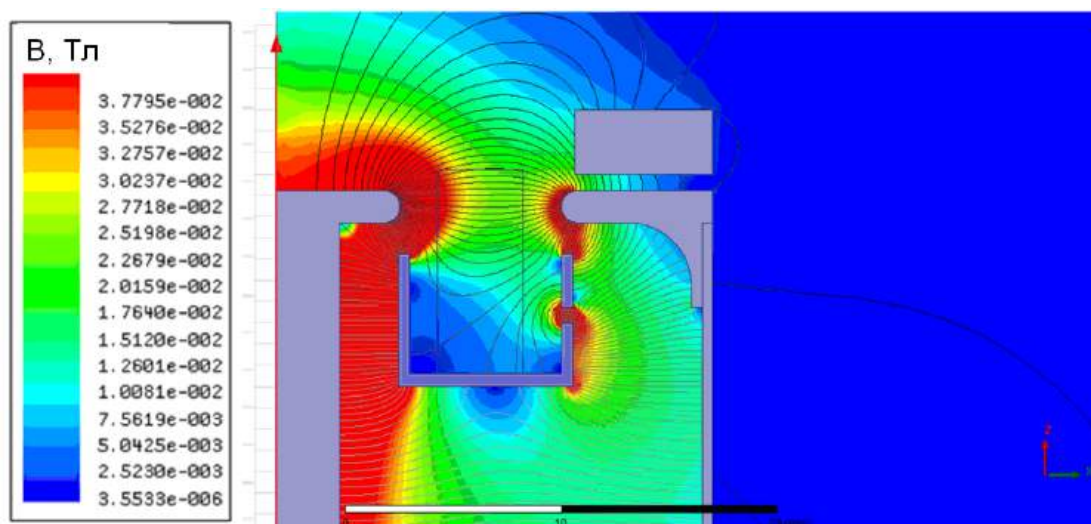


Рисунок 2.57 – Результати розрахунків для конструкції варіанта 6 таблиці 2.4

На рисунках 2.58–2.60 показано розподіл індукції МП уздовж указаних вище ліній інтегрування.

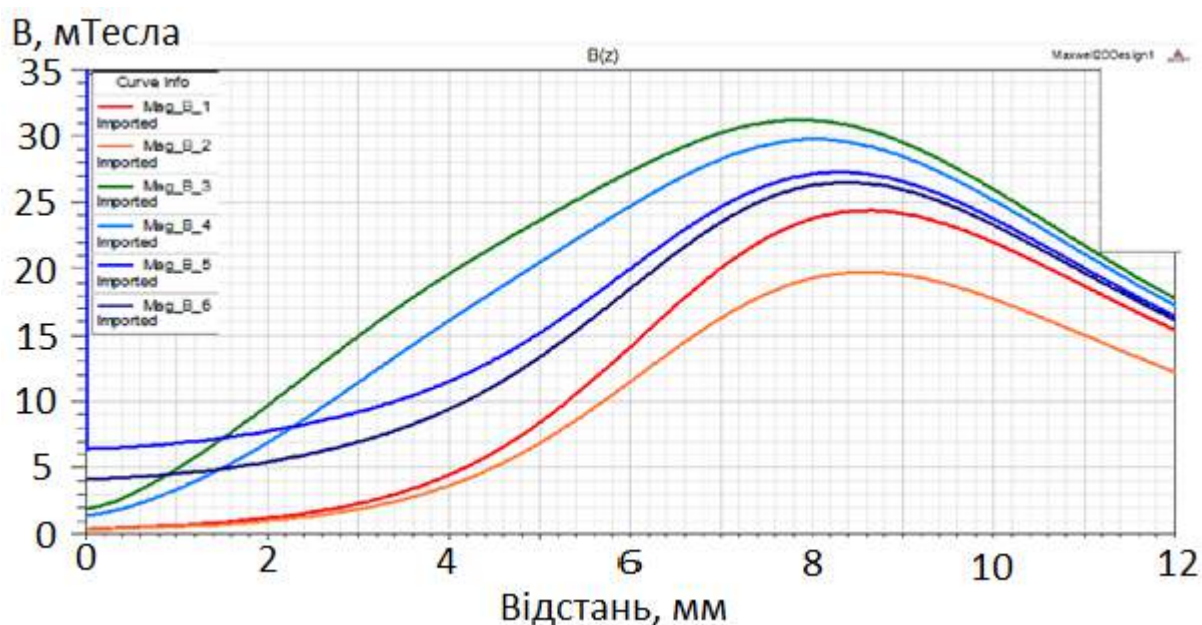


Рисунок 2.58 – Розподіл індукції МП уздовж серединної лінії РК

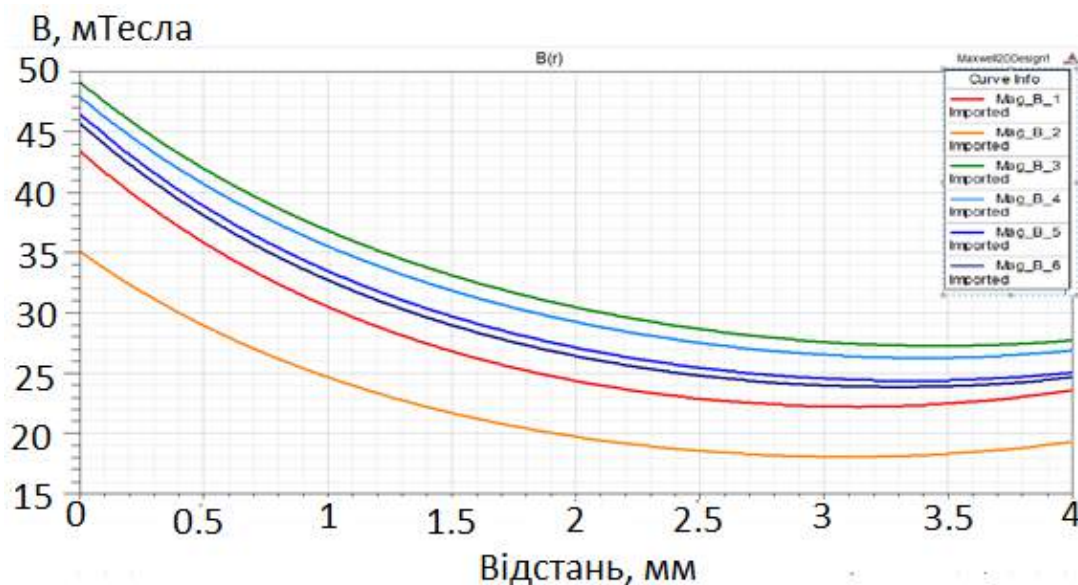


Рисунок 2.59 – Розподіл індукції МП у РК по зрізу магнітних полюсів

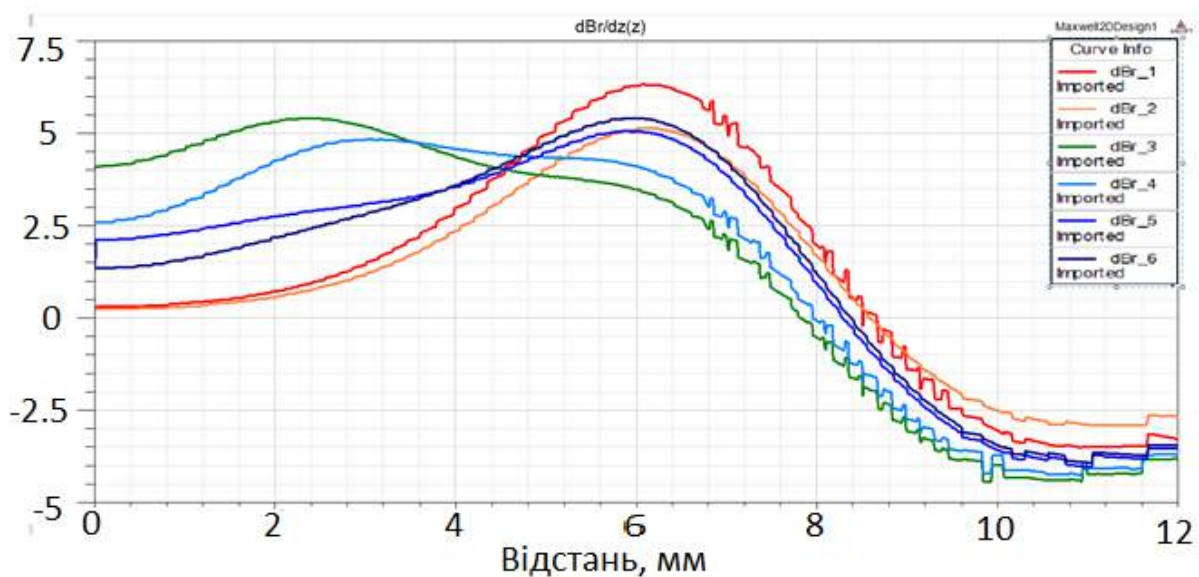


Рисунок 2.60 – Розподіл градієнта МП по серединній лінії РК

У результаті розрахунків було показано, що зменшення діаметра осердя в області анода призводить до такого:

- насичення осердя;
- зниження індукції МП у РК;
- зниження градієнта МП уздовж РК;
- градієнт по радіусу РК знижується.

Зазор у магнітному екрані (анод) призводить до такого:

- збільшення індукції МП у РК;
- максимум МП зміщується усередину РК;
- градієнт МП уздовж РК падає;
- градієнт по радіусу РК змінюється незначно.

2.1.8 Залежність МП від установки магнітних кілець усередині РК

Як варіант збільшення градієнта МП у РК був запропонований варіант установки феромагнітних кілець поблизу зрізу РК.

Варіанти розрахунків наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Варіанти розрахунків

№ п/п	Описання
1	Базовий варіант
2	Кільце з 27КХ по зовнішній кераміці, на зрізі зовнішнього полюса
3	Кільця з 27КХ по внутрішній і зовнішній кераміках, на зрізі полюсів
4	Кромки заокруглені радіусом 0,2 мм
5	Кільця з 27КХ по внутрішній і зовнішній кераміках, по центру полюсів; кромки заокруглені радіусом 0,2 мм

Графічне відображення результатів моделювання показано на рисунках 2.61 – 2.65.

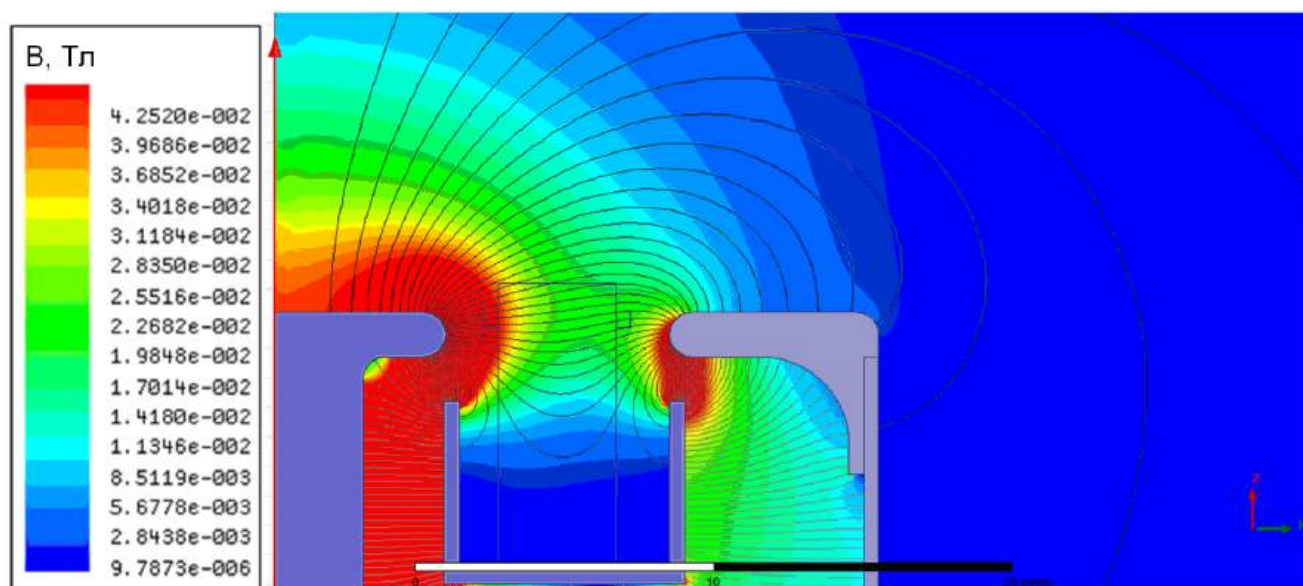


Рисунок 2.61 – Результати розрахунків конструкції варіанта 1 таблиці 2.5

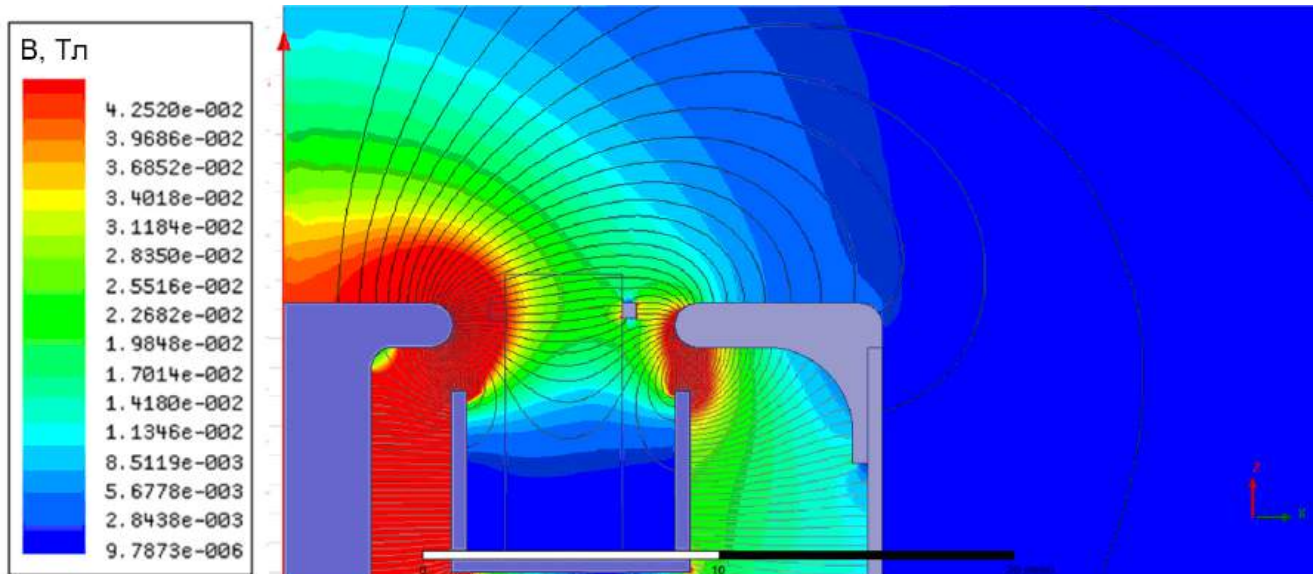


Рисунок 2.62 – Результати розрахунків конструкції
варіанта 2 таблиці 2.5

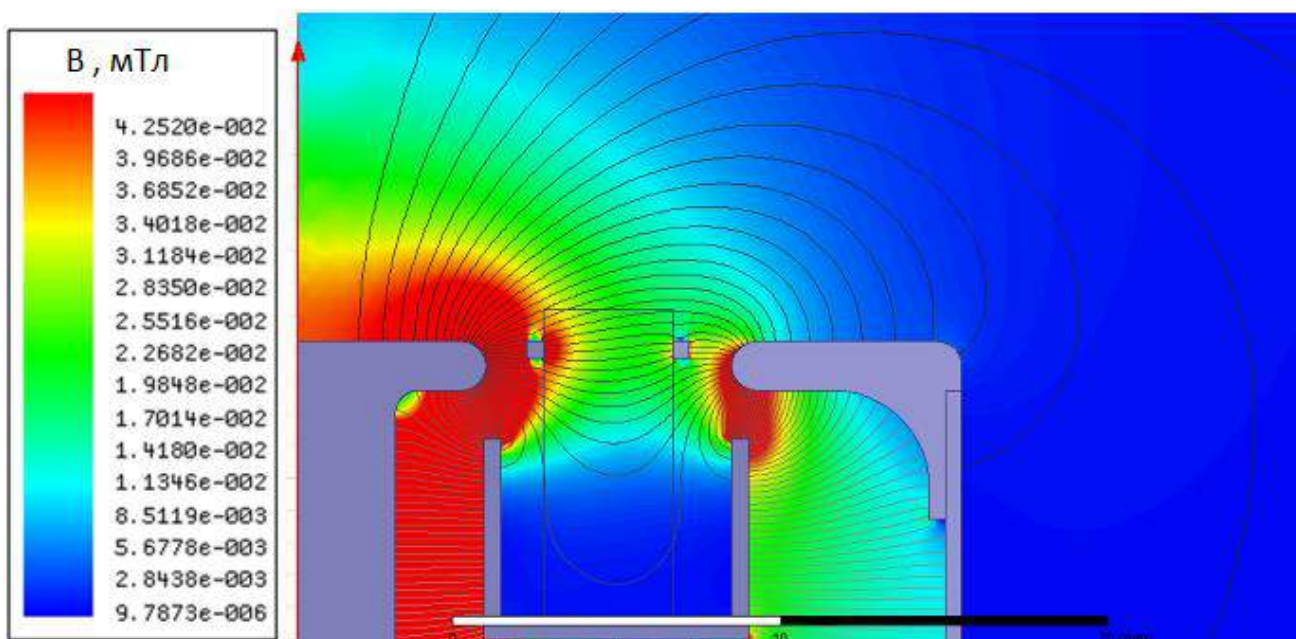


Рисунок 2.63 – Результати розрахунків конструкції
варіанта 3 таблиці 2.5

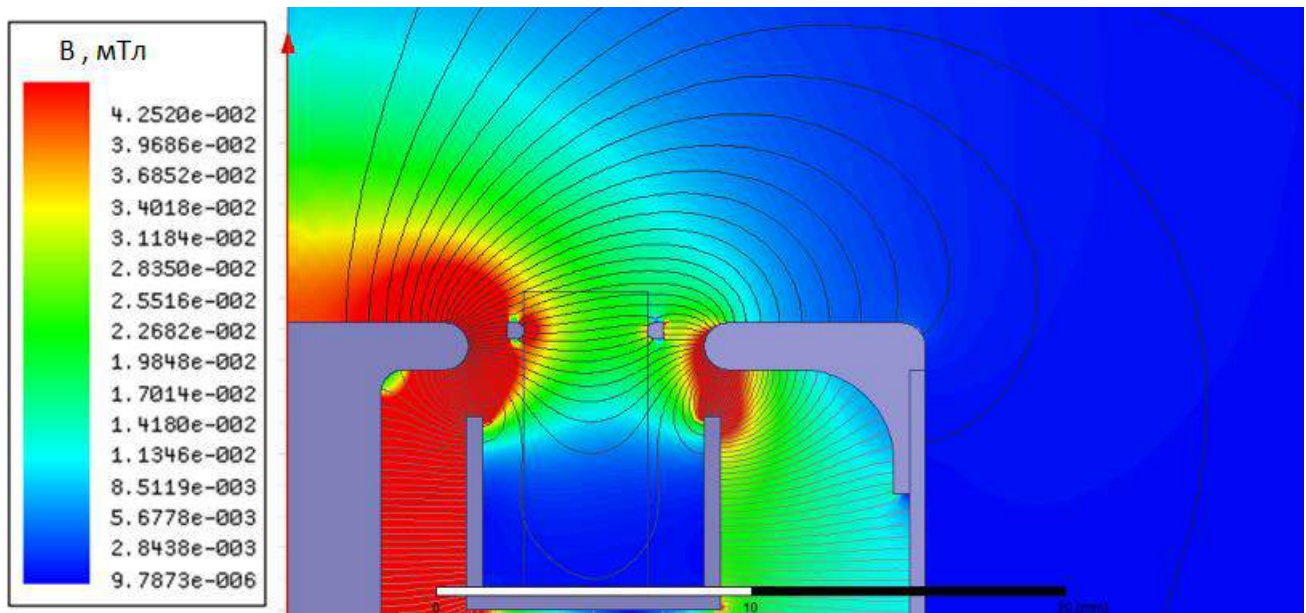


Рисунок 2.64 – Результати розрахунків конструкції
варіанта 4 таблиці 2.5

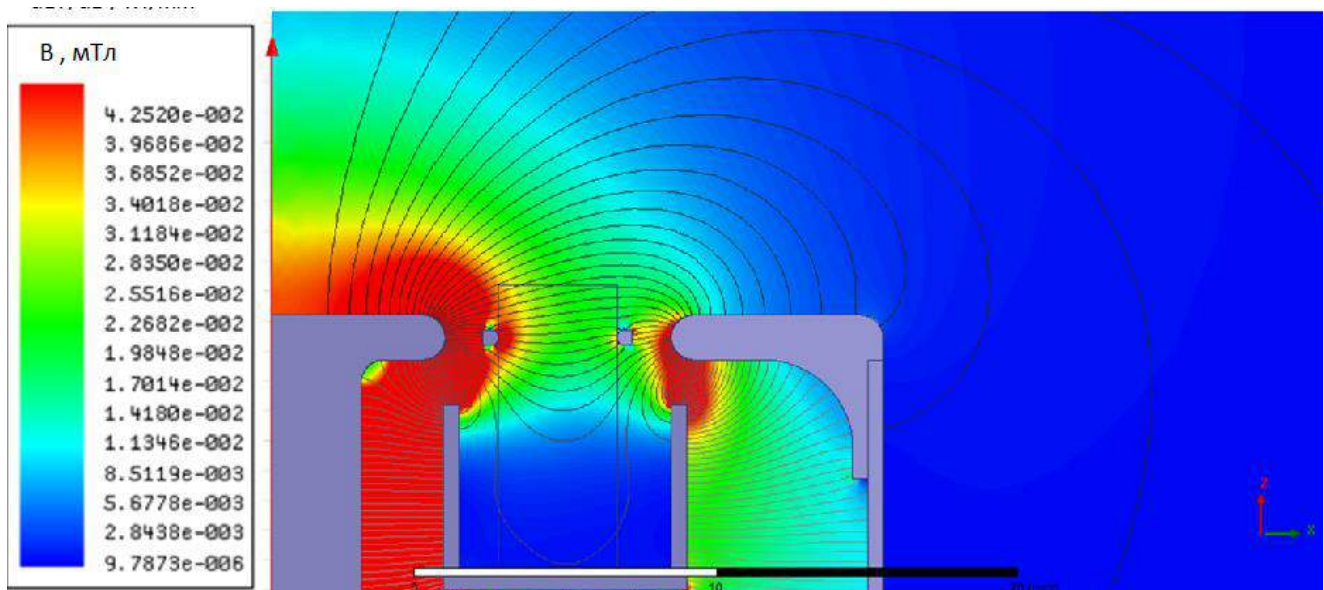


Рисунок 2.65 – Результати розрахунків конструкції
варіанта 5 таблиці 2.5

На рисунках 2.66–2.68 показано розподіл індукції МП уздовж
вказаних вище ліній інтегрування.

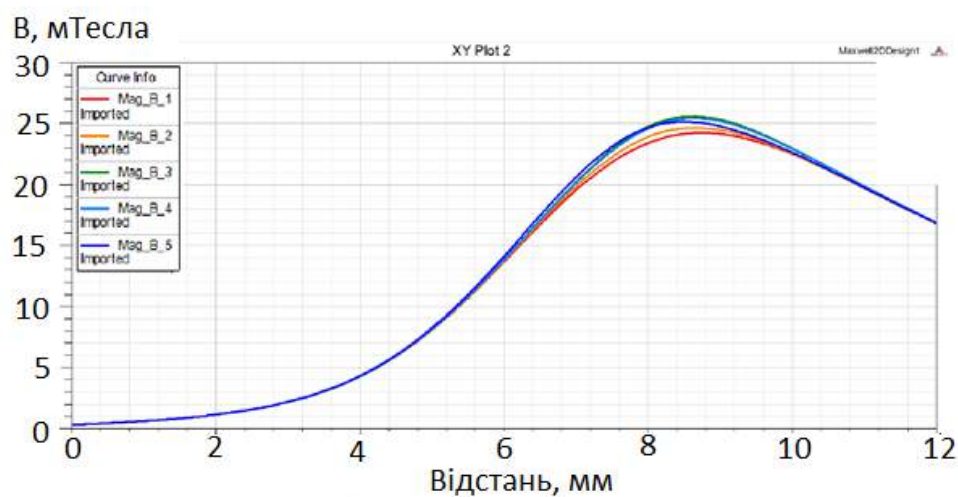


Рисунок 2.66 – Розподіл індукції МП уздовж серединної лінії РК

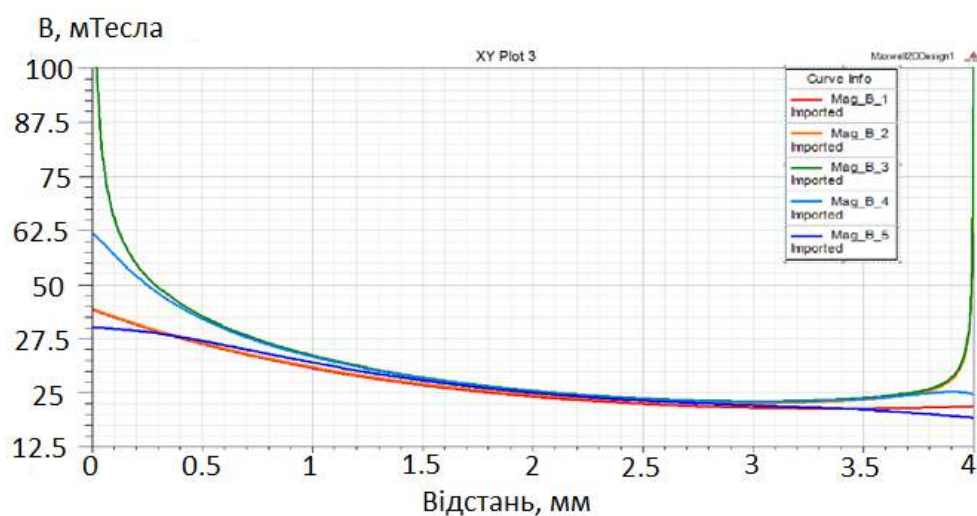


Рисунок 2.67 – Розподіл індукції МП у РК по зрізу магнітних полюсів

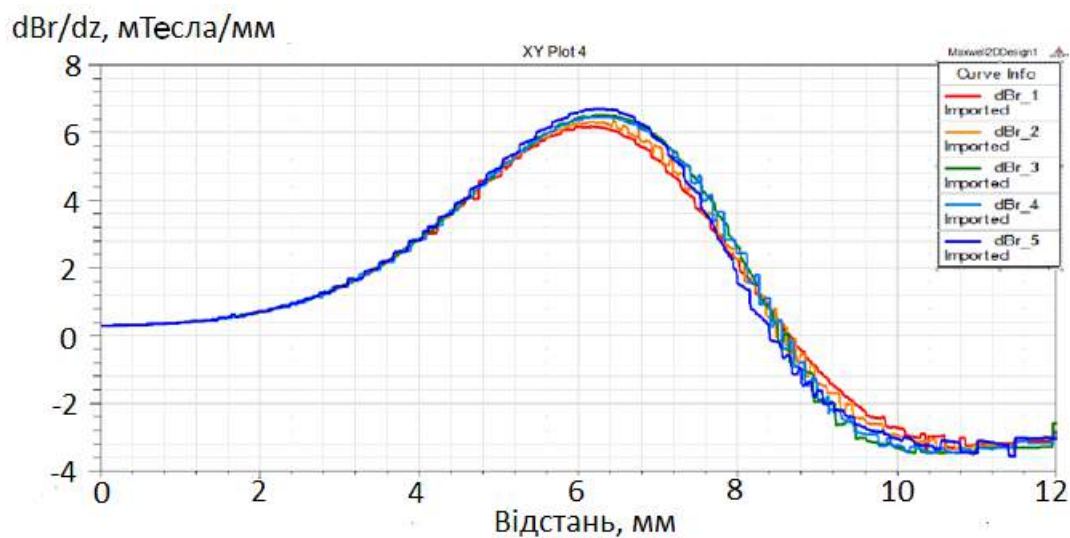


Рисунок 2.68 – Розподіл градієнта МП по серединній лінії РК

У результаті моделювання було відзначено, що введення феромагнітних кілець поблизу зрізу РК призводить до такого:

- збільшуються індукція МП і градієнт по серединній лінії у РК;
- зміщення кілець усередину каналу зрушує максимум МП у той же бік;
- заокруглень країв забезпечує менший МП поблизу стінок РК;
- зменшується нахил МСЛ до осі двигуна в РК.

Внесення змін у конфігурацію магнітної системи двигуна може значно змінити конфігурацію МП у РК. Як найбільш перспективні методи поліпшення розподілу МП у РК можна розглядати застосування зовнішньої котушки намагнічування навпроти зовнішнього полюса, а також внесення феромагнітних кілець у РК. Решта з розглянутих методів, такі, як зміна діаметра внутрішнього полюса і осердя, а також застосування зазору в магнітному екрані виглядають як менш ефективні або погіршують розподіл МП.

2.2 Розрахунок теплового стану двигуна

Під час роботи стаціонарний плазмовий двигун схильний до нагрівання. Основними джерелами тепла є потоки високоенергетичних іонів, що взаємодіють зі стінками КН, а також котушки намагнічування, у яких при протіканні струму виділяється джоулево тепло. У процесі розроблення двигуна бажаним є оцінювання температур у критичних вузлах двигуна. Такими вузлами є місця пайки газових трубок, ізоляція електричних проводів. У разі перевищення допустимої температури може статися поломка двигуна. Перевищення температури магнітопроводів вище точки Кюрі веде до різкого погіршення їх магнітних властивостей, що призводить до зниження характеристик двигуна.

Існує велика кількість програм, оснований на методі скінченних елементів (МСЕ), для розрахунку теплових полів. Для цього використовувався ANSYS Workbench 16.2 з пакетом steady-state thermal.

Розрахунок проводився у такий спосіб. На базі 3d моделі двигуна була створена модель (рисунок 2.69). Потім були задані теплові властивості застосовуваних матеріалів – теплопровідність і ступінь чорноти поверхонь (таблиця 2.6).

Теплові навантаження були задані таким чином. Відомо, що основна взаємодія потоку іонів і стінок ПК відбувається на вихідних крайках каналу. При анодному ККД двигуна 70 % і розрахунковій потужності 1500 Вт тепловий потік на стінки каналу може досягати 450 Вт. На рисунку 2.70 показано поверхні, на які поставлено цей тепловий потік.

Згідно з інформацією про двигуни даного типу сумарна потужність, що виділяється в котушках намагнічування, становить ≈ 50 Вт.

Таблиця 2.6 – Теплові властивості матеріалів

Властивості	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·град)	Ступінь чорноти
Матеріали		
49КФ	28	0,5
10880	69	0,4
Д16Т	130	-
12Х18Н10Т	20	0,3
АБН	10	0,8
Al ₂ O ₃	130	0,8

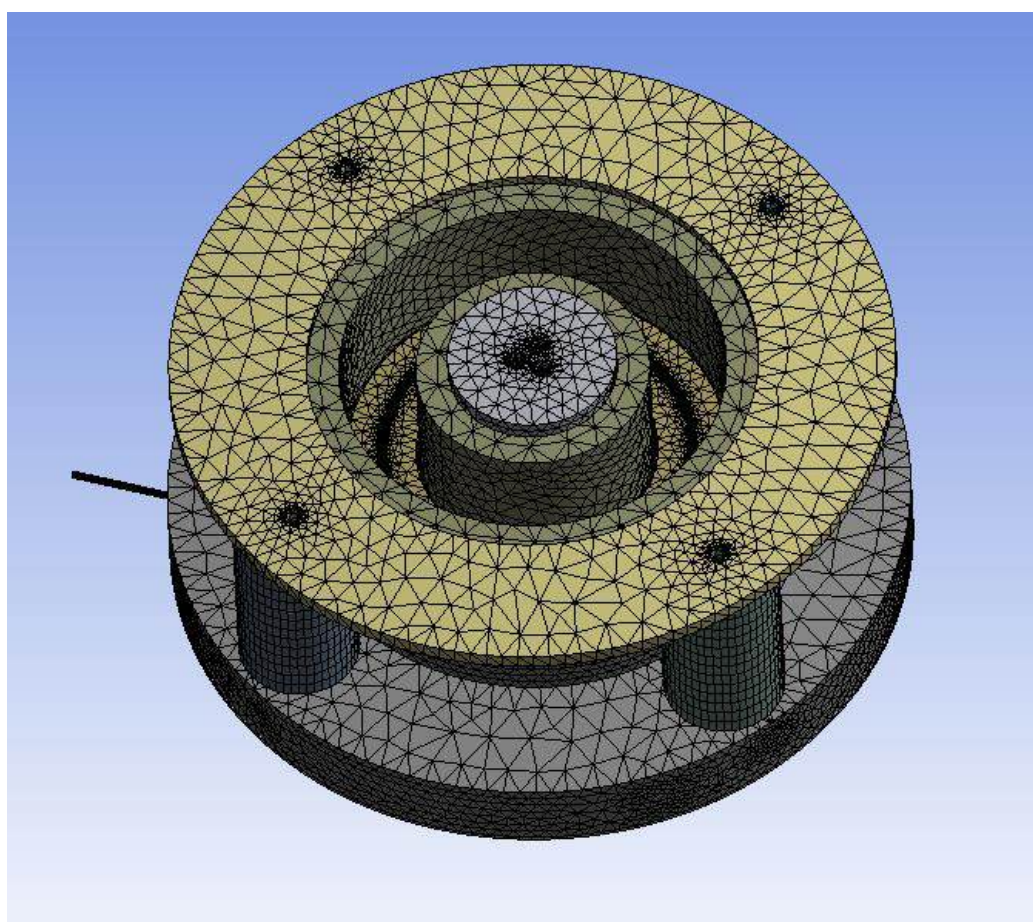


Рисунок 2.69 – Модель СПД

Охолодження двигуна відбувається шляхом теплового випромінювання з усіх поверхонь двигуна.

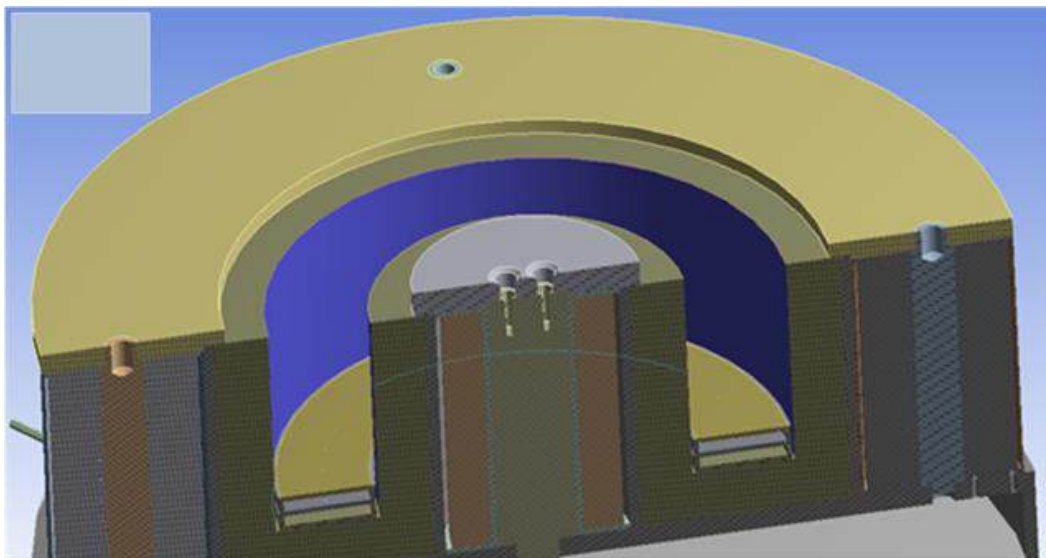


Рисунок 2.70 – Поверхні КН, на які задається тепловий потік від заряджених частинок робочого тіла

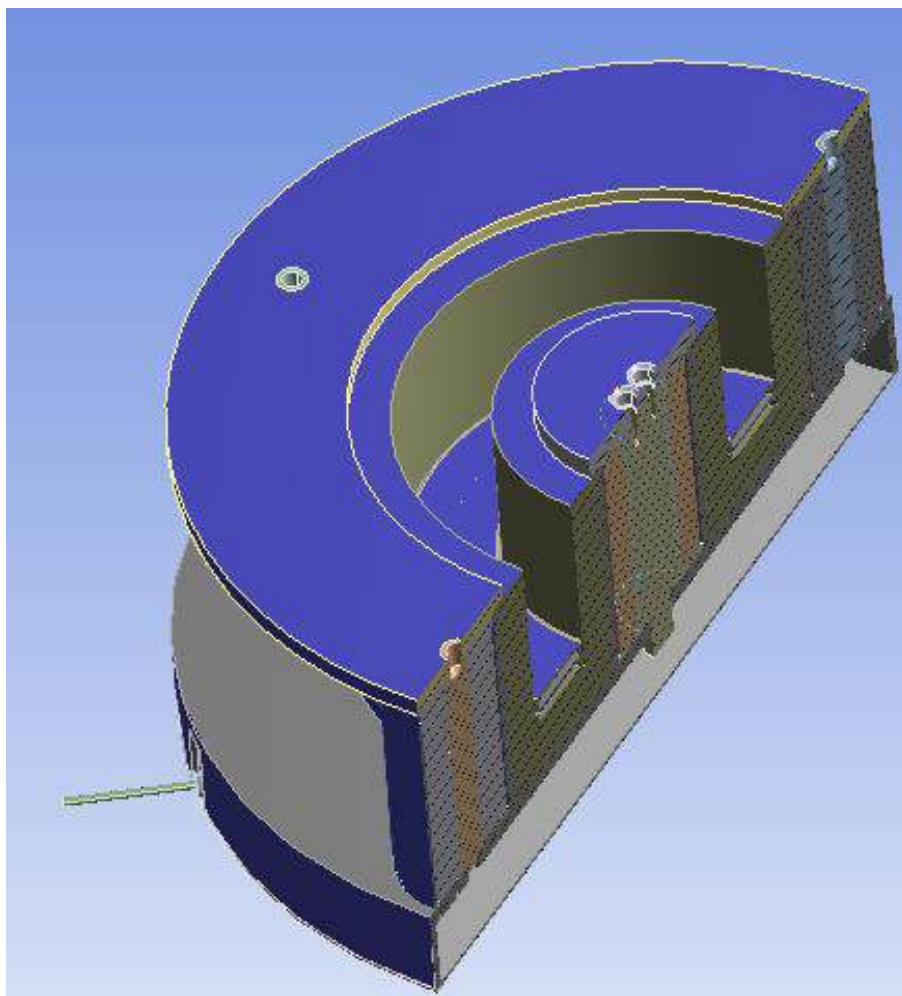


Рисунок 2.71 – Поверхні, з яких відбувається теплове випромінювання

На рисунку 2.72 показано розрахований розподіл температури по конструкції двигуна. Максимальну температуру має вихідна кромка внутрішньої стінки РК ($\approx 500^\circ\text{C}$). Температура котушок намагнічування становить $\approx 500^\circ\text{C}$. Для проводу ПОЖ-700 з робочою температурою до 700°C ця температура є допустимою. Усі паяні з'єднання мають припій з температурою плавлення понад 600°C (марка ПСР600 ПСрМПД ПСр72), що так само вище за максимальну температуру двигуна.

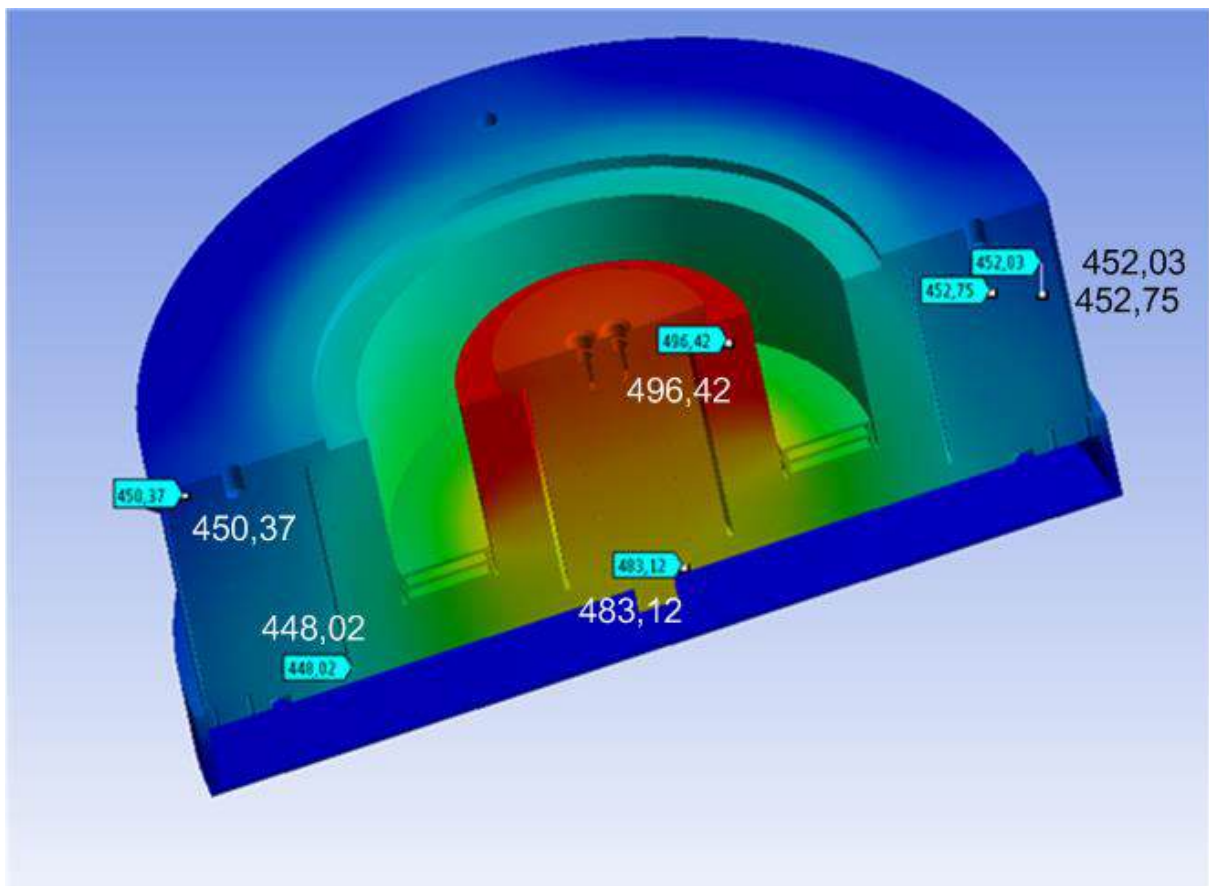


Рисунок 2.72 – Розподіл температур у двигуні

Тепловий розрахунок показує, що температура елементів двигуна не перевищує максимально допустимих значень.

2.3 Аналіз конструкції СПД на стартові навантаження

Важливим питанням при розробленні ЕРД є забезпечення стійкості конструкції двигунів (рисунок 2.73) до механічних навантажень, що виникають при старті ракети-носія, а саме – до інерціальних, вібраційних і ударних. Вібрації виникають унаслідок протікання нестаціонарних процесів усередині маршового двигуна ракети-носія і процесу обтікання ракети атмосферним повітрям. Небезпеку дані вібрації спричиняють у разі

виникнення резонансу з частинами ракети або її корисного навантаження. У разі резонансу може статися утомна поломка компонентів. Перевантаження і ударні навантаження виникають при старті ракети-носія з землі, а також при відділенні ступенів ракети, унаслідок різкого набору і скидання швидкості.

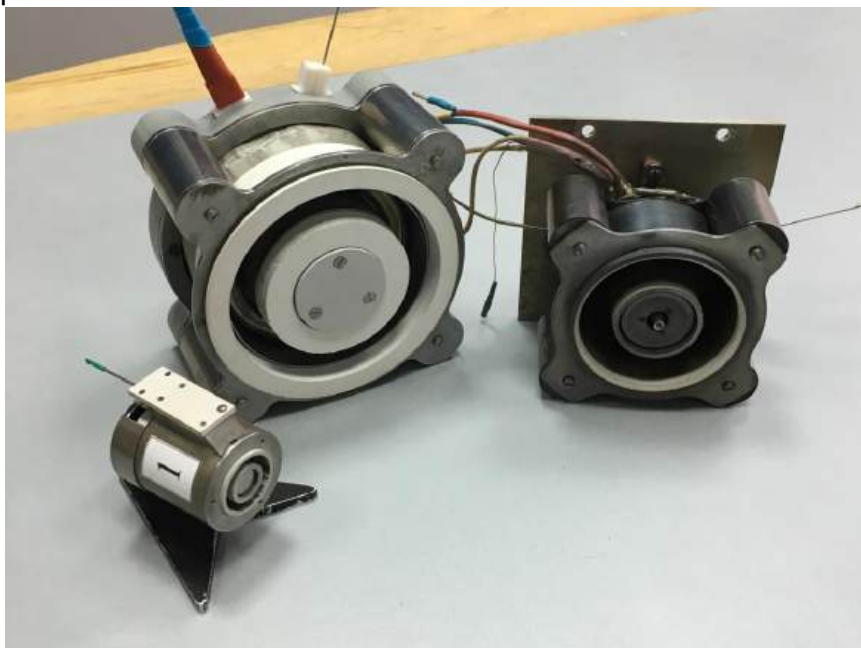


Рисунок 2.73 – СПД лабораторії ЕРД ХАІ

У процесі проектування двигунів широко використовуються методи математичного моделювання. Наприклад, аналіз конструкції методом скінченних елементів (МСЕ) надає можливість перевіряти спроектовану конструкцію до її відправки на виробництво. Унаслідок цього значно зменшується вартість проектування, оскільки зникає необхідність у випробуваннях великої кількості тестових зразків, що значно знижує час випробувань. Також з'являється можливість поетапної модернізації, спрямованої на максимальне полегшення конструкції, що є дуже важливим параметром для космічної техніки.

Тому моделювання конструкції ЕРД при стартових механічних навантаженнях є важливим етапом проектування двигунів.

У процесі розрахунку зазвичай використовується пакет програм ANSYS Workbench, який дозволяє провести розрахунки ударних і вібраційних навантажень за допомогою МСЕ. У даному середовищі проводиться пошук власних частот двигуна (ANSYS modal), у результаті якого визначаються небезпечні частоти. Після цього модель двигуна перевіряється в умовах гармонійних вібрацій (ANSYS harmonicas response) на частотах, близьких до власних частот двигуна. Також проводиться розрахунок широкосмугових випадкових вібрацій (ШСВ) двигуна (ANSYS random vibration), що виникають у процесі польоту, і ударних навантажень на двигун (ANSYS response spectrum). Це дозволяє отримати дані про

напруги, що виникають в двигуні, і, порівнюючи їх з допустимими напругами матеріалів, зробити висновок про надійність конструкції двигуна в умовах ударних і вібраційних навантажень.

При моделюванні реальна конструкція двигуна спрощується:

- у моделі прибирають газо- та струмопідводи;
- котушки електромагнітів замінюють на мідні циліндри аналогічної маси.

Розрахункову модель двигуна СПД100 показано на рисунку 2.74.



Рисунок 2.74 – 3D модель двигуна

При моделюванні враховувався спосіб кріплення двигуна. Як жорстка зарубка вибирається задня стінка двигуна, на якій розташовуються кріпильні отвори. Це зумовлено тим, що ця площа щільно прилягає до кріпильної рами і її вібрації можливі тільки при вібрації опори, на якій розташований двигун. Для моделювання використовуються характеристики матеріалів, отримані з довідкових даних. При розрахунку задаються такі характеристики матеріалів, як щільність матеріалу, модуль

Юнга і коефіцієнт Пуассона. Магнітну систему двигуна було виготовлено з електротехнічної сталі 10880, розрядну камеру – з нітриду бору, анод і полюсні наконечники – з пермендію 49КФ, проводка і котушки електромагнітів – з міді, з'єднувальні болти і гайки – зі сталі 12Х18Н9Т і титану [16–18].

Результати аналізу наведено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Результати модельного аналізу

№ п/п	Резонансна частота, Гц	Резонуюча деталь двигуна
1	1611,1	Внутрішній магнітний сердечник і магнітна система
2	1615,7	
3	1731,8	
4	1866,2	Зовнішній полюсний наконечник
5	1918,6	
6	1920,5	
7	1980,9	
8	2457,9	Анод
9	2461,3	
10	2591,8	Зовнішній полюсний наконечник

Виходячи з технічних характеристик ракети-носія (РН) «Дніпро» (рос. Днепр) [6], у таблиці 2.8 наведено види навантажень.

Аналізуючи подані результати (таблиці 2.7, 2.8), а саме – власні резонансні частоти двигуна і діапазон випадкової вібрації 20...2000 Гц, було прийнято рішення модернізувати конструкцію двигуна з метою підвищити резонансні частоти до рівня понад 2000 Гц. За результатами аналізу найбільш критичними елементами, які потребують доопрацювання, були магнітна система, внутрішній магнітний сердечник і зовнішній полюсний наконечник.

Модернізація конструкції двигуна

З метою підвищення рівня резонансних частот, у конструкцію двигуна були внесені такі зміни:

- внутрішній магнітний сердечник виготовлений порожнистим;
- магнітну систему було потовщено і додатково посилено ребрами жорсткості;
- зовнішній полюсний наконечник був потовщений.

Таблиця 2.8 – Стартові навантаження ракети «Дніпро»

Вид навантаження	Частота, Гц	Навантаження, g
Синусоїдальна вібрація	5-10	0,5 g
	10-15	0,6 g

Продовження таблиці 2.8

Вид навантаження	Частота, Гц	Навантаження, g
Широкопasmовa випадкова вібрація	15-20	0,5 g
	20-160	0,007g ² /Гц
	160-320	0,022-0,035 g ² /Гц
	320-640	0,035 g ² /Гц
	640-1280	0,035-0,017 g ² /Гц
	1280-2000	0,017-0,005 g ² /Гц
Ударні навантаження	30	5 g
	1000	1000 g
	5000	1000 g

Модернізована конструкція двигуна була повторно розрахована на дію стартових навантажень.

Результати модального аналізу вдосконаленої конструкції наведено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Результати модельного аналізу вдосконаленої конструкції двигуна

№ п/п	Резонансна частота, Гц	Резонуюча деталь двигуна
1	1902,0	Магнітна система
2	2107,3	
3	2118,2	
4	2242,6	Зовнішній полюсний наконечник
5	2351,7	
6	2355,3	
7	2470,5	
8	2604,5	Анод
9	2623,6	
10	3923,3	Зовнішній полюсний наконечник

З даних таблиці видно, що резонансні частоти двигуна значно зросли. При цьому тільки одна резонансна частота магнітної системи потрапляє у діапазон стартових випадкових вібрацій. З метою перевірки конструкції на стійкість до стартових навантажень було проведено моделювання напруг, що виникають. Результати моделювання конструкції двигуна під дією синусоїдальної вібрації, ШСВ і ударних навантажень наведено в таблиці 2.10. Як допустимі значення напруг у конструкції СПД100 були взяті напруги, що відповідають границі текучості матеріалу, розділеного на коефіцієнт запасу міцності, прийнятому в 1.1. У результаті розрахунків були отримані значення максимальних напруг на тримачі РК і магнітній системі.

Таблиця 2.10 – Результати моделювання під дією вібраційних і ударних навантажень

Вид навантажень	Максимальне напруження, МПа	Назва деталі, матеріал	Додаткове значення, МПа
Синусоїдальна вібрація	0,034	Тримач РК, 29НК	227
Широкопasmогова випадкова вібрація	3,186		
Ударні навантаження	До 60		
Навантаження іншого характеру	До 35	Магнітна система, сталь 10880	136

Таким чином, максимальні напруги в конструкції удосконаленої моделі СПД100 не перевищують 26 % від граничних, що говорить про стійкість конструкції до стартових навантажень і можливості подальшого зниження маси.

2.4 Висновки

Проведене моделювання двигуна типу СПД100 на дію стартових навантажень дозволило виявити критичні місця конструкції і провести її модернізацію. Результати аналізу вдосконаленої конструкції двигуна продемонстрували стійкість СПД до стартових навантажень.

3 ПРИНЦИП ВИБОРУ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕМЕНТІВ СПД

Основні властивості матеріалів конструкції: міцність, електропровідність, теплопровідність, термостійкість та інші визначають працездатність і цілісність двигуна при транспортуванні і виведенні його на орбіту, а також при експлуатації на розрахункових режимах.

Ураховуючи, що протягом робочого циклу двигуна температура анода змінюється від космічного холоду ($\sim 100\text{ K}$) до робочої ($\leq 900\text{ K}$), як матеріал для його виготовлення вибирають леговану сталь 9X18H1ПТ, яка повинна мати високу жаростійкість і високий поріг холодноламності, а також низький тиск насичених парів, що забезпечує малу швидкість випаровування матеріалу в вакуум. З цього матеріалу виготовляють газопідвідні трубки і з'єднувальні елементи (гвинти, гайки, шайби та ін.). Цей матеріал має низьку магнітну проникність, а виготовлені з нього елементи конструкції не викривляють конфігурації магнітного поля.

Загальні вимоги до матеріалу РК:

- міцність;
- висока температура плавлення;
- низький тиск насичених парів;
- вібростійкість;
- технологічність оброблення;
- невисока вартість.

Крім загальних існує ще ряд специфічних положень, що характеризують умови роботи ізолятора в цій конструкції:

- високий електроопір;
- низька теплопровідність;
- низький коефіцієнт іонного розпилення.

Унаслідок бомбардування іонами РК схильна до зносу і значною мірою визначає ресурс двигуна. У цей час як матеріал для виготовлення РК найбільш освоєний алюмонітрид бору (АБН – 1), також застосовуються боросіл, сіалон, нітрид бору (BN), TiO_2 , Si_3N_4 , найбільш низький коефіцієнт розпилення має оксид алюмінію (Al_2O_3) (таблиця 3.1), проте його застосування обмежене через низьку технологічність оброблення.

Елементи магнітної системи виконують з магнітом'яких матеріалів, що мають високу магнітну проникність (μ), низьку коерцитивну силу (H), невеликі втрати на перемагнічування та вузьку петлю гістерезису (зазвичай це феромагнетики). До феромагнетика належать перехідні метали – залізо, кобальт, нікель.

Властивості цих матеріалів характеризуються наявністю в їх структурі домена. Домен – це область, у межах якої елементарні магнітні моменти

атомів орієнтовані взаємно паралельно, унаслідок чого такий матеріал намагнічується до повного насичення.

Таблиця 3.1 – Характеристики матеріалів, що застосовуються для СПД

Матеріал	α 1/К	$T_{пл}$ К	$\rho/10^3$ Кг/м ³	λ Вт/(мК)	C КДж(кгК)	$E/10^5$ МПа	σ_B МПа	G кг/м ² с
Окис алюмінію	$9 \cdot 10^{-6}$	2303	3,96	2,59	1,13	3,45	210	$1,4 \cdot 10^{-8}$
Окис магнію	$15 \cdot 10^{-6}$	2773	3,58	3,48	0,78	1,91	100	$31,1 \cdot 10^{-8}$
Окис торію	-	3073	9,59	5,7	0,23	1,17	100	$1,05 \cdot 10^{-9}$
Двоокис цирконію	$11 \cdot 10^{-6}$	2973	6,27	0,72	0,7	1,18	110	$1,01 \cdot 10^{-9}$
Нітрид бору	-	3023	-	12,13	0,92	1,09	90	$1,01 \cdot 10^{-8}$
Нітрид цирконію	-	3273	6,88	1,4	0,55	1,11	87	-
Карбід бору	$9 \cdot 10^{-6}$	2723	3,14	1,73	0,95	0,95	87	-
Карбід кремнію	-	2823	4,90	0,14	1,26	0,85	49	-
Карбід танталу	-	4423	14,98	0,45	0,46	1,1	51	-

Позначення в таблиці 3.1:

α – коефіцієнт температурного розширення, 1/К;

$T_{пл}$ – температура плавлення, К;

ρ – густина, кг / м³;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(мК);

C – теплоємність, Дж/(КГК);

E – модуль пружності, Па;

B – границя міцності, Па;

G – швидкість випаровування у вакуумі (при тиску 10^{-4} Па), кг/(м²с).

Магнітні матеріали повинні мати кристалічну будову, тобто атоми в них мають розташовуватися упорядковано один відносно одного. У феромагнітному матеріалі при температурі нижче його точки Кюрі значення відношення між атомної відстані «а» до радіуса електронної оболонки « r_d » (a/r_d) наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Дані магнітних матеріалів

Метал	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
a/r_d	2,24	2,36	2,94	3,26	3,64	3,96

З підвищенням температури феромагнетика енергія теплового руху атомів збільшується і при досягненні критичної температури стає більше енергії обмінної взаємодії, у результаті чого впорядкованість взаємного розташування атомних магнітних моментів порушується й тіло переходить у парамагнітний стан.

Критична температура, що відповідає перетворенню феромагнетиків у парамагнетики, називається точкою Кюрі. У таблиці 3.3 наведено значення точок Кюрі феромагнетиків (металів).

Таблиця 3.3 – Значення точки Кюрі для деяких металів

Метал	Fe	Co	Ni	Cd
Точка Кюрі, К	1041	1393	633	513

Процес намагнічування феромагнетика в зовнішньому магнітному полі в координатах напруги зовнішнього магнітного поля (H) і магнітної індукції (B) описується залежністю, показаною на рисунку 3.1.

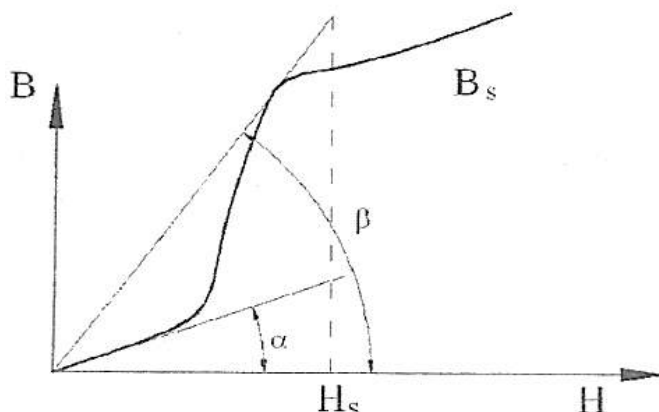


Рисунок 3.1– Залежність індукції від напруги магнітного поля

На рисунку 3.1 H_s – величина напруги зовнішнього магнітного поля, при якому досягається максимальне значення індукції (індукція насичення) B_s і максимальне значення магнітної проникності:

$$\mu_m = \frac{B_s}{H_s} = \operatorname{tg} \beta.$$

При зменшенні спрямованості зовнішнього магнітного поля починається розмагнічування матеріалу, але крива розмагнічування не збігається з кривою намагнічування. Це явище відоме під назвою гістерезису. Залишкова намагніченість тіла при цьому характеризується залишковою індукцією B_r . Величина залишкової індукції залежить від кількості доменів перемагнічування з протилежним напрямком векторів намагнічування.

Напруженість поля, необхідна для розмагнічування феромагнетика, називається коерцитивною силою H_c . Через розбіжності кривих намагнічування і розмагнічування виникає петля гістерезису (рисунок 3.2).

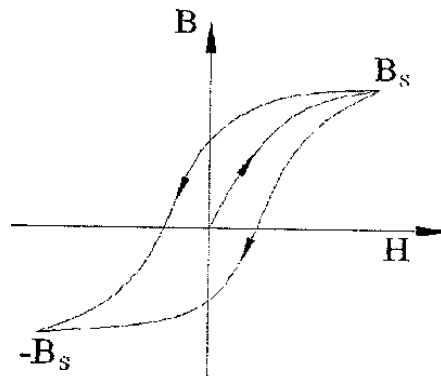


Рисунок 3.2 – Явище гістерезису

Площа петлі гістерезису пропорційна величині магнітних утрат, що виникають у матеріалі при перемагнічуванні і так званих утратах на гістерезис. Ці втрати пов'язані з необхідністю здійснення роботи при повороті доменів.

Магнітом'які матеріали, що застосовуються у магнітних ланцюгах СПД, ПІД та ін., зазвичай поділяються на сталь і залізо, виходячи з вмісту вуглецю і технологічного способу їх виробництва.

Сталь – сплав заліза з вуглецем, отриманий у мартенівських або електричних печах, що містить не більше 0,1 % вуглецю і мінімальну кількість марганцю, кремнію та інших домішок. Залізо – низьковуглецева сталь з вмістом вуглецю менше 0,025 %. У таблиці 3.4 наведено хімічний склад цих матеріалів.

Таблиця 3.4 – Хімічний склад матеріалів, що використовуються у конструкції СПД

Матеріал	Хімічний склад					
	C	Si	Mn	S	P	Cu
Армко-залізо	0,025	0,05	0,035	0,025	0,08	0,08
Електролітичне залізо	0,004	0,04	0,02	0,04	-	-
Карбонільне залізо	0,01	0,01	0,005	0,005	-	-

Технічне залізо або армко-залізо виплавляється у мартенівських печах. Електролітичне залізо отримують шляхом електролізу розчину сірчанокислого або хлористого заліза, карбонільне залізо – шляхом розкладання пентар-карбоніту заліза.

У таблиці 3.5 наведено магнітні властивості заліза різного ступеня чистоти.

Таблиця 3.5 – Магнітні властивості заліза різного ступеня чистоти

Залізо	Магнітні та електричні властивості				
	μ_a	μ_m	H_c , А/м	B_s , Тл	$\rho_{y\partial} \cdot 10^6$, Ом·м
Технічне	200	700	64	2,18	0,1
Електролітичне	300	15000	28	2,20	0,1
Карбонільне	3300	21000	6,4	2,17	0,1

Позначення у таблиці 3.5:

μ_a – коефіцієнт магнітної проникності;

μ_m – максимальне значення коефіцієнта магнітної проникності;

H_c – коерцитивна сила, А / м;

B_s – максимальна магнітна індукція, Тл;

$\rho_{y\partial}$ – питомий електричний опір, Ом·м.

У таблиці 3.6 наведено матеріали різних елементів конструкції двигуна потужністю 0,650 Вт (розробник – лабораторія ЕРД ХАІ).

Таблиця 3.6 – Матеріали елементів конструкції двигуна потужністю 0,650 Вт

Назва деталі	Матеріал
Осердя зовнішнє	49кф
Полюс зовнішній	
Кераміка зовнішня	АБН
Кераміка внутрішня	АБН
Розв'язка 1	ВК-94
Розв'язка 2	ВК-94
Гайка М16	12Х18Н10Т
Шайба	
Гайка М4_А	
Каркас котушки внутрішньої	Д16-Т
Каркас котушки зовнішньої	Д16-Т
Анод (передня стінка)	12Х18Н10Т
Анод (центральна частина)	12Х18Н10Т
Анод (задня стінка)	12Х18Н10Т
Газоподвід	12Х18Н10Т
Шпилька	12Х18Н10Т
Бобишка	12Х18Н10Т
Магнітопровід	10880
Осердя внутрішнє	49КФ
Полюс внутрішній	10880

Для намотування котушок намагнічування використовують мідний дріт у жаростійкій ізоляції типу ПОЖ з максимальною робочою температурою в

діапазоні 400...600 °С, що має високу електропровідність і низьку вартість. Між обмоткою і корпусом котушки вставляється діелектрична прокладка зі слюди для запобігання виникненню електричного розряду на корпус.

У конструкції СПД застосовують з'єднання пайкою і клейові з'єднання. Основною вимогою, що ставиться до припою і клеїв, є збереження електромеханічних властивостей при характерних робочих температурах порядку 300°С. Як припій використовують ПСР 3 (ГОСТ19738-74), клей К-400 (ОСТ92-0949-74).

4 РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ДВИГУНА

Основний зміст розрахунку на міцність двигуна зводиться до знаходження запасу міцності деталей, що працюють тривалий час в умовах високих температур і значних температурних градієнтів; особливістю його є розрахунок на міцність деталей з тугоплавких матеріалів – вольфраму, молібдену, кераміки та ін.

Основними розрахунками в плазмовому двигуні є розрахунок на міцність анода.

Однією з найбільш напружених деталей плазмового двигуна є його анод. Розрахунок анода слід вести для двох випадків.

- Перший розрахунковий випадок – це тривала робота анода на маршовому режимі двигуна, коли розрахунковим навантаженням на анод є тиск плазми або робочого тіла і характерними умовами – високі температури оболонки анода і тривалий час роботи. На цьому режимі в силу релаксаційних явищ температурні напруги будуть незначні.

- Другий розрахунковий випадок – це режим запуску двигуна, коли розрахунковими умовами навантаження на анод будуть теплові навантаження, що створюють великі температурні перепади як по довжині анода, так і по товщині його стінки при порівняно невеликій тривалості дії, що дорівнює часу пуску двигуна. Таким чином, у цьому випадку слід визначати температурні напруги в аноді двигуна.

Аноди плазмових двигунів мають циліндричну, конічну і більш складні форми. Розглянемо розрахунок циліндричного анода. Будемо розглядати його як оболонку, навантажену, внутрішнім тиском, а потім – і перепадом температур.

4.1 Розрахунок циліндричних анодів, навантажених тиском

Дано геометричні розміри оболонки h , модуль пружності E . Потрібно знайти напруги σ_x , σ_φ і прогин у напрямку осі Z .

Уважаємо, що на елемент оболонки діють сили внутрішнього тиску p . Докладемо до нього сили, що компенсують сили взаємодії елемента (рисунок 4.1). По гранях елемента будуть діяти в окружному напрямку сили T_φ і моменти M_φ . Вони дорівнюють один одному по обидва боки завдяки осьовій симетрії оболонки.

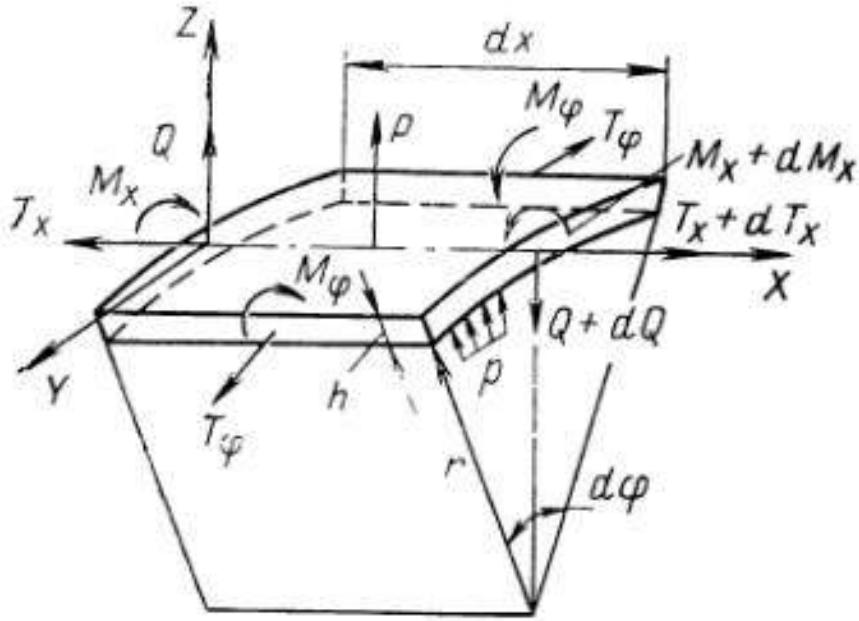


Рисунок 4.1 – Елемент циліндричної оболонки

В осьовому напрямку сили T_x , Q і момент M_x будуть змінюватися уздовж виділеного елемента, так як у цьому напрямку симетрії навантаження може і не бути. Зазвичай сили і моменти, прикладені до граней, розглядають як розподілені по довжині навантаження. Будемо їх позначати T , Q і M . Очевидно,

$$T_x = \bar{T}_x r d\varphi; T_x + dT_x = \bar{T}_x r d\varphi + d(\bar{T}_x r d\varphi); \quad (4.1)$$

$$M_x = \bar{M}_x r d\varphi; M_x + dM_x = \bar{M}_x r d\varphi + d(\bar{M}_x r d\varphi); \quad (4.2)$$

$$Q = \bar{Q} r d\varphi; Q + dQ = \bar{Q} r d\varphi + d(\bar{Q} r d\varphi); \quad (4.3)$$

$$T_\varphi = \bar{T}_\varphi r d\varphi; M_\varphi = \bar{M}_\varphi; P = p r d\varphi dr. \quad (4.4)$$

Проектуємо всі сили на осі X і Z і знаходимо суму моментів щодо осі, паралельної осі Y , що збігається з правою гранню елемента. Отримаємо

$$d(\bar{T}_x r d\varphi) = 0; \quad (4.5)$$

$$-d(\bar{Q} r d\varphi) - 2\bar{T}_\varphi dx \frac{\sin d\varphi}{2} + p r d\varphi dx = 0; \quad (4.6)$$

$$-d(\bar{M}_x r d\varphi) + \bar{Q} r d\varphi dx = 0. \quad (4.7)$$

Перше рівняння системи (4.1) указує на те, що сили $T_x = \text{const}$. Напруга теж $\sigma_x = T_x / h = \text{const}$. Цей вираз говорить про те, що в циліндричній оболонці напруги в напрямку осі X не залежить від напруги в окружному напрямку. Якщо вони будуть відрізнятися від нуля, то можуть бути підсумовані з тими, які з'являються в результаті розв'язування інших двох рівнянь:

$$\begin{aligned} \bar{Q}' - 0.5T_\varphi &= p; \\ \bar{M}'_x + \bar{Q}_x &. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Ці два рівняння містять три невідомі величини: T_φ , Q і M_x . Розглянемо деформацію серединної поверхні оболонки під дією сил T_φ .

Сили T_φ , діючи нормально до перетину оболонки в окружному напрямку, створюють окружні «мембранні» (безмоментні) напруги.

Обчислимо відносну деформацію елемента (рисунок 4.2) під дією сили T_φ :

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\overset{\frown}{a'b'} - \overset{\frown}{ab}}{\overset{\frown}{ab}} = \frac{(r + \omega)d\varphi - rd\varphi}{rd\varphi} = \frac{\omega}{r}. \quad (4.9)$$

Звідси

$$\sigma = E\varepsilon_\varphi = E\omega/r. \quad (4.10)$$

Із

$$\sigma_\varphi = \bar{T}_\varphi / h, \quad (4.11)$$

отримуємо

$$\bar{T}_\varphi = \frac{Eh\omega}{r}. \quad (4.12)$$

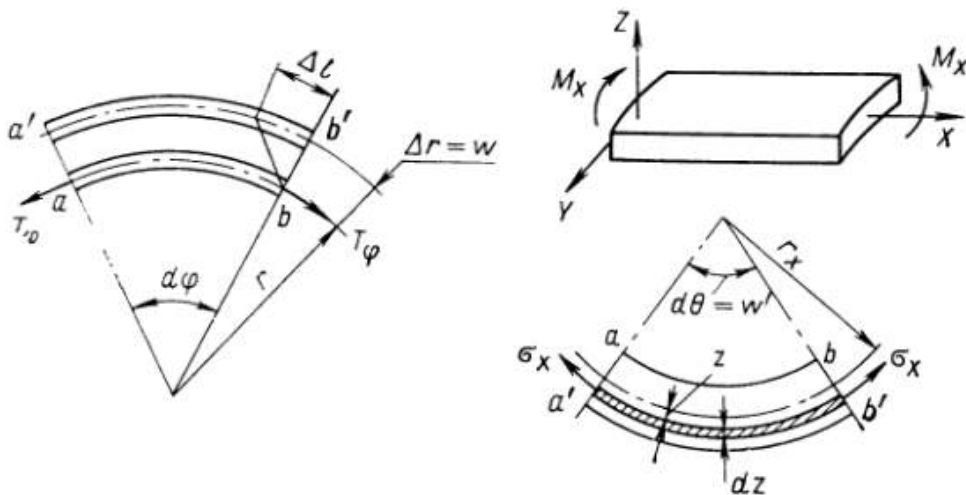


Рисунок 4.2 – Деформація елемента оболонки

Очевидно, навантаження T_φ не впливає на деформацію ε_x , оскільки $\varepsilon_x = 0$.

Розглянемо оболонку під дією згинального моменту M_x . Знайдемо відносну деформацію. Край оболонки можна уявити як елемент пластини. Відносна деформація

$$\varepsilon_x(M) = \frac{a'b' - ab}{ab} = \frac{(r_x + z)d\theta - r_x d\theta}{r_x d\theta} = \frac{z}{r_x}. \quad (4.13)$$

Відомо, що кривизна

$$K = \frac{1}{r_x} = \frac{d^2 \omega}{dx^2} = \omega''. \quad (4.14)$$

І остаточно

$$\varepsilon_x(M) = z\omega''. \quad (4.15)$$

Моментне навантаження не спричиняє окружних деформацій $\varepsilon_\varphi(M)$, тому приходимо до висновку

$$\varepsilon_\varphi(M) = 0. \quad (4.16)$$

Напруги від моментного навантаження визначатимуться з таких відомих співвідношень Гука для пластини:

$$\sigma_x(M) = \frac{E}{1-\mu^2} [(\varepsilon_x(M) + \mu\varepsilon_\varphi(M))] = \frac{Ez}{1-\mu^2} \omega''. \quad (4.17)$$

$$\sigma_\varphi(M) = \frac{E}{1-\mu^2} [(\varepsilon_\varphi(M) + \mu\varepsilon_x(M))] = \mu\varepsilon_x(M). \quad (4.18)$$

Знайдемо згинальний момент M_x :

$$dM_x = \sigma_x(M)zdz, \quad (4.19)$$

звідки

$$\overline{M}_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x(M)zdz = \frac{E\omega''}{1-\mu^2} \int_{-h/2}^{h/2} z^2 dz = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \omega'' = D\omega'', \quad (4.20)$$

$$\overline{M}_\varphi = \mu\overline{M}_x, \quad (4.21)$$

де

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}. \quad (4.22)$$

Повертаємося до першого рівняння системи (9.2). Підставляючи в нього

$$\overline{M}'_x = \overline{Q}, \quad (4.23)$$

отримуємо

$$\overline{M}''_x = \frac{1}{r} \overline{T}_\varphi = p, \quad (4.24)$$

звідки за допомогою рівнянь (4.23) і (4.24) знайдемо

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(D \frac{d^2 \omega}{dr^2} \right) + \frac{Eh\omega}{r^2} = p. \quad (4.25)$$

Це основне рівняння вигину циліндричної оболонки. Воно дозволяє знайти її деформований стан під дією різних навантажень. Рівняння (4.25) належить до класу лінійних неоднорідних диференціальних рівнянь четвертого порядку. При виведенні його ми не накладали обмежень на характер зміни параметрів оболонки, і вони можуть бути істотно змінними величинами.

5 РОЗРАХУНОК ФІЗИЧНОЇ НАДІЙНОСТІ

Надійність – властивість виробу виконувати задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники в заданих межах протягом необхідного проміжку часу або необхідного напруження.

Надійність виробу – це велика кількість складових: тут розглядаються лише фізична або характеристика міцність, надійність, тобто безвідмовність роботи протягом заданого часу, що забезпечується обраним запасом міцності деталей виробу. Математично надійність виражається через імовірність безвідмовної роботи конструкції і записується у вигляді $P = \{U > 0\}$, де $U = \sigma_B - \sigma_M$ – функція неруйнування.

Звичайна формула запасу міцності $n = \sigma_B / \sigma_M$ передбачає, що σ_B і σ_M – детерміновані величини.

Насправді, σ_B – границя міцності; σ_M – максимальне напруження залежать від великої кількості випадкових факторів, унаслідок чого випадковою величиною буде і запас міцності n .

Приймаємо нормальний закон розподілу для випадкових величин σ_B і σ_M . Щільність їх розподілу доріватиме

$$f(\sigma_M) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}d_{\sigma_M}} \exp\left(-0.5 \frac{(\sigma_M - M\sigma_M)^2}{d_{\sigma_M}^2}\right), \quad (5.1)$$

$$f(\sigma_B) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}d_{\sigma_B}} \exp\left(-0.5 \frac{(\sigma_B - M\sigma_B)^2}{d_{\sigma_B}^2}\right), \quad (5.2)$$

де $M\sigma_M$, $M\sigma_B$ – математичні очікування величин σ_B і σ_M ;

$d_{\sigma_M}^2$ і $d_{\sigma_B}^2$ – дисперсії величин σ_B і σ_M .

Графічно функції (1.53) і (1.54) показано на рисунку 5.1. Очевидно, деталь буде працювати не руйнуючись, якщо виконується умова $\sigma_M \leq \sigma_B$, і зруйнується, якщо $\sigma_B < \sigma_M$. У цьому випадку $U < 0$.

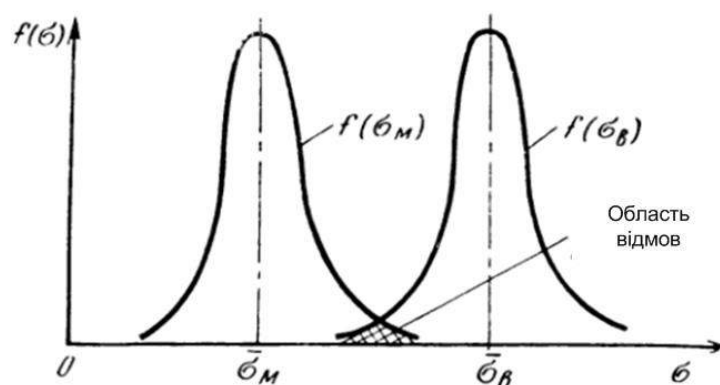


Рисунок 5.1 – Закони розподілу діючої напруги і несучої здатності

Функція щільності розподілу для величини U буде нормальною і запишеться так:

$$f(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}d_u} \exp\left(-0,5 \frac{(U-\bar{U})^2}{d_u^2}\right), \quad (5.3)$$

де

$$\begin{aligned} U &= M\sigma_B - M\sigma_M; \\ d_U^2 &= d_{\sigma_B}^2 + d_{\sigma_M}^2. \end{aligned} \quad (5.4)$$

Імовірність руйнування

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2\pi}d_u} \int_{-\infty}^0 \exp\left(-0,5 \frac{(U-\bar{U})^2}{d_u^2}\right) dU, \quad (5.5)$$

а ймовірність неруйнування, яка протилежна відмові,

$$P = 1 - Q = \frac{1}{\sqrt{2\pi}d_u} \int_{-\infty}^0 \exp\left(-0,5 \frac{(U-\bar{U})^2}{d_u^2}\right) dU, \quad (5.6)$$

Замінімо змінні в останньому виразі на

$$\begin{aligned} x &= \frac{(U-\bar{U})}{d_U}; \\ dU &= d_U dx. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Тоді

$$P = 1 - \int_{-\infty}^{\frac{\bar{U}}{dU}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = 1 - \Phi\left(-\frac{\bar{U}}{dU}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{M\sigma_M - M\sigma_B}{dU}\right). \quad (5.8)$$

$$\Phi\left(\frac{\bar{U}}{dU}\right) = \int_{-\infty}^{\frac{\bar{U}}{dU}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx. \quad (5.9)$$

Функція $\Phi(x)$ (інтеграл Гаусса) табульована. Розділимо числівник і знаменник аргумента функції Φ виразу $M\sigma_M$:

$$P = 1 - \Phi\left(\frac{1 - n_{np}}{\sqrt{\sigma_M^2 + \bar{n}^2 \sigma_n^2}}\right), \quad (5.10)$$

де середній запас міцності і коефіцієнти варіації

$$n_{np} = M\sigma_B / \sigma_M, \quad (5.11)$$

де $n_{np} = M\sigma_B / \sigma_M$ – середній запас міцності; $v_M = dM\sigma_M / \sigma_M$; $v_B = dM\sigma_B / \sigma_B$ – коефіцієнти варіації.

Отриманий вираз (1.56) пов'язує запас міцності n і ймовірність неруйнування. Зазвичай коефіцієнти варіації змінюються у таких межах: $v_M = 0,05 \dots 0,10$; $v_B = 0,02 \dots 0,10$ [19–21].

6 ПРИКЛАДИ ВИКОНАННЯ

6.1 Інтегральні характеристики двигуна

Основними вихідними (інтегральними) характеристиками СПД є:

- тяга;
- питомий імпульс тяги;
- тяговий ККД;
- споживана потужність.

Питомий імпульс тяги дорівнює відношенню тяги F до масової секундної витрати робочого тіла, що має розмірність кг/с. По суті питомий імпульс – усереднена швидкість реактивного струменя, що створює тягу, і, відповідно, має розмірність швидкості метр в секунду:

$$I_s = \frac{F}{\dot{m}}, \quad (6.1)$$

$$I_s[c] = \frac{I_s[m/c]}{g}, \quad (6.2)$$

де g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81$ м/с.

Коефіцієнт використання робочого тіла, так званий коефіцієнт газової ефективності, характеризується відношенням потоку маси іонів, що виходить з двигуна і має розмірність кг/с, до величини масової витрати на вході в двигун:

$$\eta_r = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}}. \quad (6.3)$$

Електричний ККД ЕРД η_e визначається як відношення тягової (реактивної) потужності струменя N_T до електричної потужності N , що підводиться до двигуна:

$$\eta_e = \frac{N_T}{N}. \quad (6.4)$$

Тягова потужність струменя – це кінетична енергія осьового руху іонів за одну секунду, що визначається за формулою

$$N_T = \frac{\dot{m}_i (\langle \bar{v}_i \rangle_{II})^2}{2}, \quad (6.5)$$

де $\langle v_i \rangle_{\parallel}$ – проекція на вісь струменя середньої швидкості іонів, що витікали з двигуна.

Слід зазначити, що тягова потужність струменя N_T , менше повної потужності струменя, що характеризує повну кінетичну енергію руху іонів, витікаючих з двигуна за одну секунду:

$$N_c = \frac{\dot{m}_i (\langle \bar{v}_i \rangle)^2}{2}, \text{ оскільки } (\langle \bar{v}_i \rangle_{\parallel})^2 < (\langle \bar{v}_i \rangle)^2. \quad (6.6)$$

Повний ККД двигуна, що характеризує як ефективність використання електричної енергії, так і ефективність використання робочого тіла, є добуток коефіцієнта використання робочого тіла і енергетичного ККД:

$$\eta = \eta_{\Gamma} \eta_e. \quad (6.7)$$

Споживана ЕРД електрична потужність N пропорційна тязі F , яка розвивається двигуном, питомому імпульсу тяги I_s і обернено пропорційна повному ККД двигуна:

$$N = \frac{F I_s}{2\eta}. \quad (6.8)$$

Знайдемо з цієї формули η і отримаємо співвідношення, що застосовується для визначення ККД двигуна в ході його випробувань, за даними, які записуються при експерименті (тяга, масова секундна витрата робочого тіла і споживана електрична енергія):

$$\eta = \frac{F I_s}{2N} = \frac{F^2}{2\dot{m}N}. \quad (6.9)$$

Зараз при аналізі ефективності роботи холлівських двигунів, що складаються з анодного і катодного блоків, у технічній літературі нарівні з повним ККД двигуна набули поширення такі поняття, як анодний ККД η_A і анодний питомий імпульс тяги I_{s_A} . Коефіцієнт η_A характеризує ефективність використання потужності розряду і робочого тіла в анодному блоці:

$$\eta_A = \frac{F I_{s_A}}{2N_p} = \frac{F^2}{2\dot{m}_A N_A}, \quad (6.10)$$

де $I_{s_A} = F/\dot{m}_A$, $\dot{m}_A$ – секундна масова витрата робочого тіла через анодний блок;

N_p – потужність розряду.

При порівнянні виразів для визначення η і η_A видно, що анодний ККД не враховує втрати робочого тіла в катоді-компенсаторі m_k ($m = m_A - m_k$) і

витрати енергії на роботу катода-компенсатора N_K і магнітної системи N_{MC} ($N_P = N - N_K - N_{MC}$), якщо для цих вузлів використовуються окремі джерела живлення.

Вираз для енергетичної ціни тяги C_T , що визначається як відношення споживаної двигуном електричної потужності до тяги, можна отримати, використовуючи формулу електричної потужності двигуна N :

$$C_T = \frac{N}{F} = \frac{I_s}{2\eta}. \quad (6.11)$$

ЕРД дозволяють реалізувати гранично високі швидкості робочого тіла на виході з двигуна і, отже, істотно зменшити масу рухової установки економією палива. Однак у міру збільшення швидкості витікання робочого тіла при фіксованій витраті зростають потужність двигуна, і потрібна більш важка енергоустановка, що знижує позитивний ефект від економії палива.

Існує поняття оптимального значення питомого імпульсу тяги $I_{s_{опт}}$, що відповідає мінімуму маси енергорухової установки. Оптимальний питомий імпульс тяги визначається не тільки параметрами двигуна і ДУ, а й особливостями конкретної розв'язуваної задачі з урахуванням енергомасового розвитку бортової енергетики. Зокрема, для коригувальних енергорухових установок орбітальних КА справедливий такий вираз:

$$I_{s_{опт}} \approx \sqrt{\frac{2\tau\eta_{ДУ}}{\alpha_{ЕДУ}}}. \quad (6.12)$$

де τ – час роботи двигуна;
 $\eta_{ДУ}$ – ККД рухової установки;
 $\alpha_{ЕРУ}$ – питома маса енерухової установки,

$$\alpha_{ЕРУ} \gg \frac{M_{ЕРУ}}{N_{ЕРУ}}. \quad (6.13)$$

При низькому енергетичному розкиді іонів у пучку (менше 0,5 %) у поєднанні з малим кутом розходження (20...30 °) можна обчислити тягу F і питомий імпульс тяги I_s двигуна виходячи із сили струму іонного пучка J_{Π} і потенціалу плазми $U_{пл}$ у РК, який близький до потенціалу анода РК:

$$U_{пл} = U_e + U_P. \quad (6.14)$$

де U_e – потенціал емісійного електрода, В;
 U_P – напруга розряду в РК, В.
 Розглянемо характеристики двигунів різної потужності.

6.2 Характеристики двигунів різної потужності

Одним з яскравих представників розробників СПД є конструкторське бюро «Факел», Росія. У таблиці 6.1 наведено інтегральні характеристики модельної низки двигунів потужності від 0,1 до 15 кВт.

Таблиця 6.1– Параметри модельного ряду СПД

Модель	Призначення	F, мН	N, кВт	I _{SP} , с	Тяговий ККД, %	τ, ч	Маса, кг
СПД-25	Корекція орбіти, маневри, орієнтація, стабілізація малих КА (масою ~100 кг)	7	0,1	800	20	1500	0,3
СПД-50	ЕРРУ малих космічних апаратів	14	0,22	860	26	≥2500	1,23
СПД-60	ЕРРУ малих космічних апаратів	30	0,5	1300	37	2500	1,2
СПД-70	ЕРРУ середніх космічних апаратів	40	0,66	1470	43	3100	2
СПД-100В	ЕРРУ різних космічних апаратів	83	1,35	1600	45	>9000	3,5
PPS-1350-G	Відтворена в Європі компанією Snesta Moteurs технологія SPT-100 у рамках згоди між ВКБ «ФАКЕЛ» і Snesta	84	1,5	1668	46	7000	3,5
SPT-140	Міжорбітальне транспортування, корекція орбіти важких геостаціонарних КА	290	4,5	1770	55	>9000	8,4
СПД -230	Лабораторна модель	до 785	до 15	до 2700	до 60	—	25

У таблиці 6.2 дано назви КА, на борту яких пройшли випробування двигунів різних потужностей.

Таблиця 6.2 – Застосування двигунів СПД на різних КА

Модель	Приклади КА
СПД-20	Інженерна модель Супутники серії CubaSat

Продовження таблиці 6.2

Модель	Приклади КА
СПД-25	Інженерна модель
СПД-40	Інженерна модель
СПД-50	Метеор 1-27, Космос-1066, Канопус-В
СПД-60	Деякі КА із серії «Метеор»
СПД-70	Експрес-МД1, КазСат-2,
СПД-100В	Експрес 1000К Експрес 1000Н Експрес 1000SH Експрес -AM44, АМОС-5
PPS-1350-G	SMART-1
SPT-140	Eutelsat 172В
СПД-230	Інженерна модель
СПД-1.5kW	Інженерна модель

6.3 Приклади застосування СПД

Одним із прикладів КА із застосуванням СПД є супутник SMART-1 [Small Missions for Advanced Research and Technology] – перша автоматична станція Європейського космічного агентства (з англ. European Space Agency (ESA)) для дослідження Місяця. Мета польоту – випробувати новий тип рухової установки і протестувати нові способи зв'язку космічних апаратів з Землею. Уперше провести сеанси зв'язку в оптичному діапазоні за допомогою лазерної установки, розташованої на Тенеріфе (Канарські острови) [22 – 23].

Компоновка КА SMART-1 (рисунок 6.1).

Габарити зонда $1,2 \times 1,2 \times 1,2 \text{ м}^3$, розмах сонячних батарей – 14 м. На борту SMART-1 знаходиться велика кількість приладів, призначених для досліджень Місяця і вивчення перспективних технологій:

1. SIR - Інфрачервоний спектрометр.

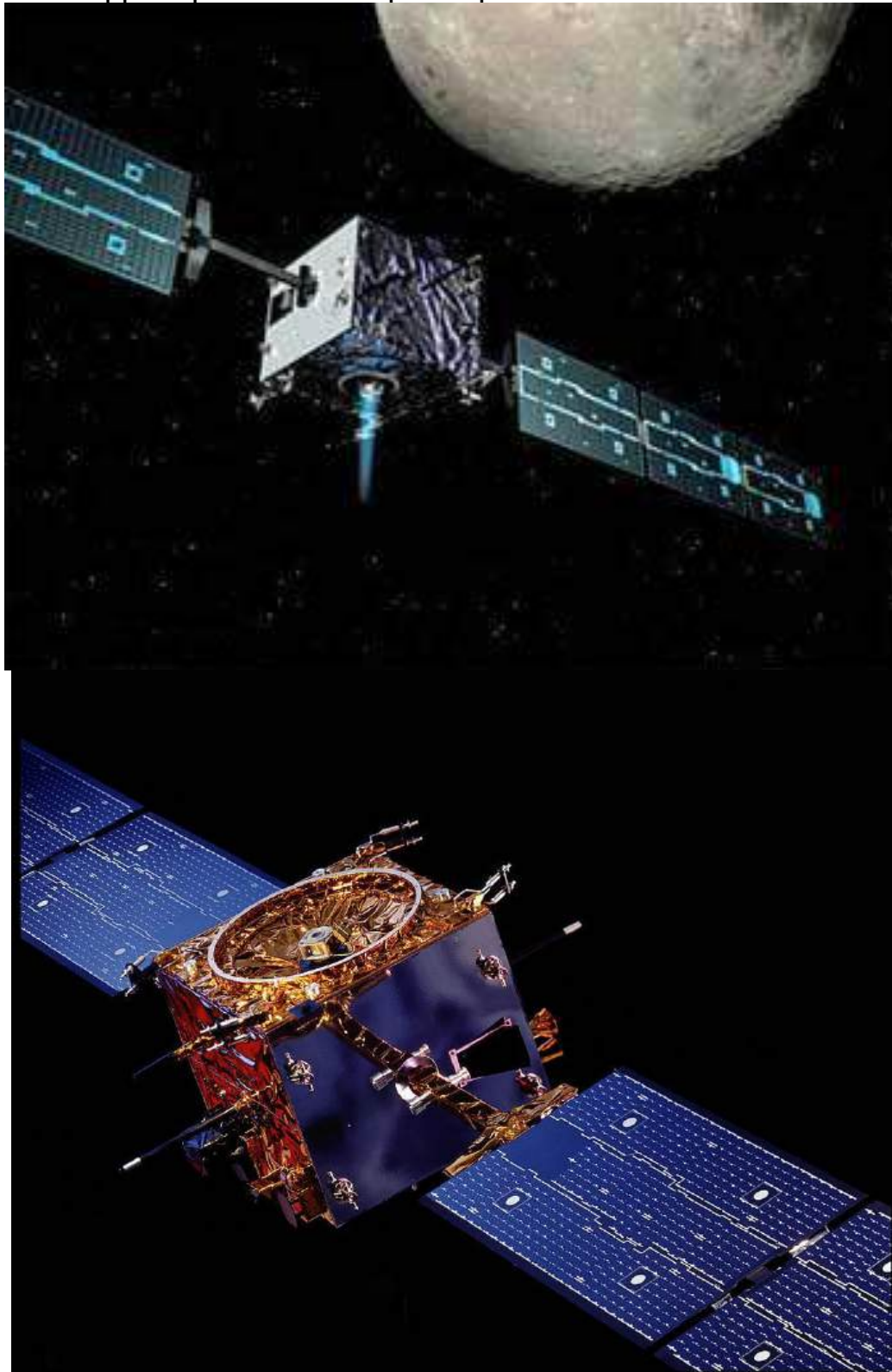


Рисунок 6.1– SMART-1

2. Сонячні датчики.
3. Стріла сенсора SPEDE (призначення – дослідження властивостей плазми навколо станції).
4. Камера AMIE (для роботи у видимому і ІЧ-діапазонах).
5. Рентгенівський телескоп D-CIXS.
6. Антена системи зв'язку.
7. Датчики для дослідження ефектів, які з'являються при роботі іонного двигуна (EPDP).
8. Паливний бак двигунів орієнтації.
9. Зоряний датчик.
10. Двигун для зміни орієнтації сонячних батарей.
11. Транспондер системи зв'язку.
12. Електроніка управління двигуном.
13. Двигуни системи орієнтації.
14. Іонний двигун з механізмом управління вектором тяги (його напрям має змінюватися у міру зміни положення центру мас, спричиненого витрачанням палива).

До складу рушійної установки цього супутника входять холлівський електростатичний двигун, створений на основі двигуна SPD-100 виробництва РКБ «Факел», система подачі й розподілу електроживлення і запас робочого тіла – 82 кг. Двигун із зовнішнім діаметром керамічної камери 100 мм і внутрішнім 56 мм розвиває тягу до 70 мН при питомому імпульсі 16400 м/с. Робоча напруга двигуна – 350 В, струм – 3,8 А, споживана потужність – 1350 Вт, витрата робочого тіла – 4,2 мг/с, ККД – 51 %. Двигун оснащений двоосьовим механізмом повороту, що дозволяє зберігати правильний напрямок вектора тяги у міру витрати робочого тіла.

Як показали результати випробувань, двигун успішно пройшов усі види досліджень.

6.4 Висновки та подальший розвиток СПД

Незважаючи на значну кількість робіт, що проводяться з дослідження даного типу ЕРД, багато параметрів двигуна можуть бути вдосконалені.

Провідні розробники ЕРД позначають основні напрямки досліджень СПД з метою збільшення не тільки ресурсу двигуна, але і його інтегральних характеристик.

Підвищення питомого імпульсу СПД змушує підвищувати розрядну напругу, що тягне за собою зниження масової витрати для зниження розрядного струму. Такий підхід необхідний для підвищення питомого імпульсу двигуна при незмінній споживаній потужності. Однак зниження масової витрати і підвищення розрядної напруги безпосередньо впливають на довжину вільного пробігу в РК і можуть змінювати картину розподілу потенціалу, температури електронів, що в свою чергу впливає

на ефективність процесів іонізації і прискорення, а також на ерозійні характеристики двигуна. Результати досліджень показали, що при незмінній конфігурації РК, за знижених масових витрат, швидкість росту тяги нижче, ніж швидкість зростання розрядного струму і що питомий імпульс і тяговий ККД двигуна значно знижуються, коли масова витрата стає нижче оптимальної.

У міру зниження витрати значення ерозії знижується і при певній витраті досягає свого мінімуму, при подальшому зменшенні витрат рівень ерозії підвищується практично до початкового рівня. Це свідчить про те, що при малих витратах в силу неоптимальних умов розряду відбувається значне випадання іонів на стінки РК що призводить до зниження ресурсу та ефективності двигуна.

Дослідження показали, що зі зменшенням масових витрат і збільшенням розрядної напруги, зростає потенціал плазми в каналі. На всіх режимах спостерігається присутність характерних зон іонізації і прискорення в РК. В області переходу між анодною порожниною й ізолятором РК існує перехідна зона з провалом потенціалу. Фронт падіння стає крутішим і зміщується ближче до зрізу РК, а витрати - нижче певного рівня. Спостерігається область з фронтом, у кінці якого потенціал трохи зростає, після чого досягає пікового значення, а потім різко звалюється. У прианодній області спостерігається зона зі зниженим плаваючим потенціалом при витратах великого значення. Температура електронів зі збільшенням розрядної напруги відповідно до розподілів потенціалу має пікові значення на кордоні анод-ізолятору і в зоні прискорення. Спостерігається пік перед зоною прискорення в області затягування фронту спадання потенціалу. Положення піків від режиму практично не залежить. Максимальне значення температури електронів відзначено для найбільшої напруги розряду.

Отримані під час досліджень дані показують, що зі зменшенням витрат і збільшенням розрядної напруги перехідні зони в РК стають більш яскраво вираженими. Пікові значення температури електронів зростають, з'являється зворотний перепад потенціалу поблизу зони прискорення, спостерігається пік перед зоною прискорення в області затягування фронту спадання потенціалу. Усе це свідчить про зростання рівня збурень плазми в РК, що неминуче призводить до втрат і зниження ефективності двигуна. Для вирішення цієї проблеми необхідно більш детально вивчити вплив розподілу нейтралей у РК, густини їх потоку, а також звернути увагу на конфігурацію анода, ізоляторів РК, розподіл магнітного поля.

Дослідження і вирішення цієї проблеми в майбутньому дозволить отримати СПД з високими значеннями питомого імпульсу, що значно розширить сферу застосування цього типу ЕРД для вирішення різних балістичних задач особливо для КА малого класу.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Галькевич, И. А. Разработка инструментария определения технико-экономических параметров космических телекоммуникационных проектов : дис. ... канд. техн. наук : 08.00.05 / Галькевич Илья Александрович. – Москва, 2015. – 171 с.
2. Оранский, А. И. Газоразрядные полые высокоэмиссионные катоды : моногр. / А. И. Оранский, А. И. Жукова-Бойко. – Харків : ХАІ, 2012. – 163 с.
3. Кулагин, С. Н. Характеристики электрореактивного двигателя холловского типа для коррекции орбиты микроспутников / С. Н. Кулагин // Техническая механика. – 2014. – № 1. – С. 105–110.
4. Меркурьев, Д. В. Способы повышения тяговых характеристик стационарного плазменного двигателя на режимах работы с высокими удельными импульсами тяги : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05 / Меркурьев Денис Владимирович. – Москва, 2015. – 138 с.
5. Морозов, А. И. Физические основы космических электрореактивных двигателей: монография / А. И. Морозов. – Москва : Атомиздат, 1978. – 360 с.
6. Максименко, Т. А. Холловский двигатель малой мощности для систем коррекции орбиты малых мини- и микроспутников / Т. А. Максименко, А. В. Лоян, Н. Н. Кошелев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 9 (25). – С. 140–144.
7. Лоян, А. В. Исследование возможности непосредственного электропитания (без промежуточных преобразователей) двигателя холловского типа от высоковольтной батареи фотоэлектрической // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 9 (126). – С. 103–107.
8. Бугрова, А. И. Стационарный плазменный двигатель малой мощности / А. И. Бугрова, Г. Э. Бугров, В. А. Давыдов // Наука и образование. – 2013. – № 10. – С. 159 – 176.
9. Построение регрессионных моделей работы СПД малых тяг / Г. К. Бахмет, А. В. Лоян, Т. А. Максименко, В. А. Подгорный // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 3. – С. 170–173.
10. Кулеша, Я. Н. Разработка и экспериментальное исследование стационарного плазменного двигателя мощностью 200 Вт / Я. Н. Кулеша, М. Ю. Титов, А. В. Лоян // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 9 (144). – С. 67–73.
11. Экспериментальное исследование влияние положения катода-компенсатора на интегральные характеристики МСПД / А. В. Лоян, Т. А. Максименко, Н. Н. Кошелев, В. А. Федотенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 10 (57). – С. 96–99.
12. Лоян, А. В. Исследование параметров плазмы в канале МСПД

при повышенных напряжениях разряда / А. В. Лоян, Т. А. Максименко, Н. Н. Кошелев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 4 (81). – С. 53–57.

13. Испытания специализированного источника электропитания «мягкого» запуска для стационарного плазменного двигателя / А. В. Лоян, М. Ю. Титов, Я. В. Бучинский, Н. Б. Чупрына // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2016. – № 4 (131). – С. 34–39.

14. Белан, Н. В. Стационарные плазменные двигатели: навч. посіб. / Н. В. Белан, В. П. Ким, А. И. Оранский. – Харьков : «Харьков. авиац. ин-т», 1989. – 315 с.

15. Бугрова, А. И. Экспериментальные исследования стационарных плазменных двигателей семейства АТОН / А. И. Бугрова, А. В. Десятков, А. С. Липатов // *Физика плазмы*. – 2010. – Т. 36. – №. 4. – С. 395–400.

16. Shagayda, A. A. The effect of wall erosion on the performance of hall thrusters / Shagayda A. A., Gorshkov O. A., Tomilin D. A. // *American Institute of Aeronautics and Astronautics: 32 International electric propulsion conference, Wiesbaden, 11–15 sept. 2011. Wiesbaden, 2011. 9 p.*

17. Khaustova, A. N. Method for the erosion rate measurements of stationary plasma thruster insulators / Khaustova A. N., Loyan A. V. // *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2017. № 3/5 (87). P. 11–17.

18. Rajput, R. U. Plasma plume diagnostics of low power stationary plasma thruster (SPT-20M8) with collisional radiative model [Electronic resource] / Rajput R. U., Khaustova A. N., Loyan A. V. // *The European physical journal applied physics*, 2017. Vol. 78, № 1. 9 p. – Access mode:

<https://www.epjap.org/articles/epjap/abs/2017/04/ap160348/ap160348.html> – 25.05.17.

19. Rajput, R. U. Development of xenon collisional radiative model for plasma diagnostics of hall effect thrusters/ Rajput R. U., Khaustova A. N., Loyan A. V // *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2017, № 2/8 (86). P. 24–29.

20. Приданников, С. Ю. Исследование характеристик стационарных плазменных двигателей при длительной работе : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05 / Приданников Сергей Юриевич. – Федер. Государственное унитарное предприятие ОКБ «ФАКЕЛ». – Калининград, 2003. – 203 с.

21. Morozov, A. I. The Conceptual Development of Stationary Plasma Thrusters // *Plasma Physics Reports*. 2003. Vol. 29, №3. P. 235–250.

22. Титов, М. Ю. Корреляция параметров плазмы с магнитным полем в канале стационарного плазменного двигателя / М. Ю. Титов, А. В. Лоян, Н. Б. Чупрына // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2016. – № 7 (134). – С. 127–133.

23. Максименко, Т. А. Исследование влияния материала разрядной камеры МСПД на его характеристики / Т. А. Максименко, А. В. Лоян // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 7 (94). – С. 153–156.

Навчальне видання

**Лоян Андрій Віталійович
Хаустова Альона Миколаївна
Тітов Максим Юрійович**

КОНСТРУКЦІЯ СТАЦІОНАРНИХ ПЛАЗМОВИХ ДВИГУНІВ

Редактор С. П. Гевло

Зв. план, 2019

Підписано до видання 11.12.2019

Ум. друк. арк. 6,3. Обл.-вид. арк. 7,12. Електронний ресурс

Видавець і виготовлювач
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
[http:// www.khai.edu](http://www.khai.edu)
Видавничий центр «ХАІ»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001