

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ**

«На правах рукопису»  
УДК 621.313

До захисту допущено:

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Вадим ЧУМАК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## **Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**за освітньо-науковою програмою «Електричні машини і апарати»**

**зі спеціальності 141**

**«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

**на тему: «Порівняння експлуатаційних показників двох варіантів виконання  
обмотки тягового двигуна ТН-81»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ЕМ-11мп  
Рибалко Андрій Андрійович \_\_\_\_\_

Науковий керівник:

доцент, к.т.н., доц.  
Шиманська Анна Анатоліївна \_\_\_\_\_

Рецензент:

доцент, к.т.н., доц.  
Красношапка Наталія Дмитрівна \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без ві-  
дповідних посилань.

Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2022 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ**  
**КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-наукова програма «Електричні машини і апарати»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Вадим ЧУМАК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**

Рибалко Андрію Андрійовичу

1. Тема дисертації «Порівняння експлуатаційних показників двох варіантів виконання обмотки тягового двигуна ТН-81», науковий керівник дисертації Шиманська Анна Анатоліївна, к.т.н, доцент, затверджені Наказом по університету від 01.11.2022 р. № 4028-с
2. Термін подання студентом дисертації 10.12.2022
3. Об'єкт дослідження Тяговий електродвигун ТН-81
4. Предмет дослідження Обмотка тягового двигуна ТН-81
5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1) здійснити аналіз загальної конструкції двигуна ТН-81, конструкції статора, ротора та колектору; 2) розрахувати потужність машини, діаметр та довжину якоря, розміри паза та обмотку якоря; 3) розрахувати розміри щіток та колектору; 4) розрахувати додаткові втрати в якорі; 5) здійснити розрахунок комутації та додаткових полюсів; 6) розрахувати обмотку збудження; 7) здійснити тепловий розрахунок; 8) порівняти два варіанти виконання обмотки якоря; 9) зробити висновки по роботі.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: загальна конструкція двигуна ТН-81, конструкція статора, ротора та колектору; розрахунок потужності машини, діаметру та довжини якоря, розміри паза та обмотка якоря; колекторно-щітковий вузол; додаткові полюси; обмотка збудження.
7. Орієнтовний перелік публікацій: 1. Comparison of two options for conducting the windings of the traction DC motor for sequential excitation; 2. Evaluation of commutation and calculation of additional poles of the traction direct current motor

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Здійснити аналіз загальної конструкції двигуна ТН-81, конструкції статора, ротора та колектору	20.09.21 – 27.11.21	виконано
2	Розрахувати потужність машини, діаметр та довжину якоря, розміри паза та обмотку якоря	28.11.21 – 15.03.22	виконано
3	Розрахувати розміри щіток та колектору	16.03.22 – 05.05.22	виконано
4	Розрахувати додаткові втрати в якорі	06.05.22 – 26.06.22	виконано
5	Здійснити розрахунок комутації та додаткових полюсів	27.06.22 – 12.09.22	виконано
6	Розрахувати обмотку збудження	13.09.22 – 30.09.22	виконано
7	Здійснити тепловий розрахунок	01.10.22 – 15.10.22	виконано
8	Порівняти два варіанти виконання обмотки якоря: з укладкою обмоткового дроту на ребро у верхній і нижній частині пазу ( варіант I ) та плоскою стороною (варіант II )	16.10.22 – 07.11.22	виконано
9	Зробити висновки по роботі	08.11.22 – 29.11.22	виконано

Студент

Андрій РИБАЛКО

Науковий керівник

Анна ШИМАНСЬКА

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (всього 14 найменування). Загальний об'єм дисертації становить 80 ст., з них основного тексту 58 ст., 9 рисунків та 14 таблиці, перелік посилань на 1 сторінці.

**Актуальність теми дослідження** Безперервно зростаюча інтенсивність руху на міських магістралях відзначається високими уповільненнями при гальмуванні і прискореннями при пуску автотранспортних засобів. В цих умовах зростає вимога до технічного стану рухомого складу, перш за все до систем, що впливають на безпеку руху і електробезпечність. Важливу роль у вирішенні названих проблем грає конструкція рухомого складу, її подальшого вдосконалення.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є порівняння експлуатаційних показників двох варіантів виконання обмотки тягового двигуна ТН-81.

Для досягнення мети роботи слід виконати завдання: здійснити аналіз загальної конструкції двигуна ТН-81, конструкції статора, ротора та колектору; розрахувати потужність машини, діаметр та довжину якоря, розміри паза та обмотку якоря; розрахувати розміри щіток та колектору; розрахувати додаткові втрати в якорі; здійснити розрахунок комутації та додаткових полюсів; розрахувати обмотку збудження; здійснити тепловий розрахунок; порівняти два варіанти виконання обмотки якоря: з укладкою обмоткового дроту на ребро у верхній і нижній частині пазу (варіант I) та плоскою стороною (варіант II); зробити висновки по роботі.

**Об'єктом дослідження** є тяговий електродвигун постійного струму з послідовним збудженням.

**Предмет дослідження становлять** число полюсів та тип обмотки, діаметр та довжина якоря, щітки та колектор, додаткові втрати в обмотці якоря, розрахунок комутації та додаткових полюсів, розрахунок магнітного кола та кривої намагнічування, розрахунок обмотки збудження, втрат та ККД, тепловий розрахунок, розрахунок струму короткого замикання, співставлення двох варіантів виконання обмотки якоря: з укладкою обмоткового дроту на ребро у верхній і нижній частині пазу (варіант I) та плоскою стороною (варіант II).

**Наукова новизна** полягає у розрахунку та порівняльному аналізі експлуатаційних показників двох варіантів виконання його якірної обмотки, а саме: з укладкою обмоткового дроту на ребро у верхній і нижній частині пазу та плоскою стороною.

**Апробація результатів дисертації.** Результати роботи магістерської дисертації були оприлюднені на Науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики» (Київ, 2021 р. та 2022 р.).

**Публікації.** Основні результати досліджень викладені в 2 наукових працях: Comparison of two options for conducting the windings of the traction DC motor for sequential excitation / A. Shymanska, M. Reutskyuyi, A. Rybalko // Науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», 9-13 грудня 2021 року, м. Київ, Україна. - С. 227-230; Evaluation of commutation and calculation of additional poles of the traction direct current motor / A. Shymanska, M. Reutskyuyi, A. Rybalko // Науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», 5-7 грудня 2022 року, м. Київ, Україна – передано до друку.

**Ключові слова:** тяговий електродвигун з послідовним збудженням, тролейбус, обмотка якоря, конструкція статора, конструкція ротора, тепловий розрахунок.

## ABSTRACT

**The master's dissertation consists of** an introduction, four chapters, conclusions, a list of used literature sources (a total of 14 titles). The total volume of the dissertation is 80 articles, including the main text of 58 articles, 8 figures and 14 tables, a list of links on 1 page.

**The relevance of the topic of the study:** Continuously increasing traffic intensity on urban highways is marked by high slowdowns in braking and accelerations in the start-up of motor vehicles. In these conditions, there is a growing requirement for the technical condition of rolling stock, primarily for systems that affect traffic safety and electrical safety. An important role in solving these problems is played by the design of rolling stock, its subsequent extension.

**Purpose and objectives of the study**^ The purpose of the work is to compare the exploit parameters of two versions of the winding of the traction motor TH-81

To achieve the purpose of the work, it is necessary to perform the task: to analyze the design of the TH-81 engine, the design of the stator, rotor and manifold; calculate the power of the machine, the diameter and length of the anchor, the dimensions of the slot and the armature winding; calculate the dimensions of the brushes and the collector; calculate the applied losses in the anchor; calculate switching and additional poles; calculate the excitation winding; carry out heat calculation; compare two versions of the armature winding: with laying of the winding wire on the edge in the upper and lower part of the groove (option I) and the flat side (option II); draw conclusions on the work.

**The object of the study** is a DC traction motor with trace excitation.

**The subject of the study** is the number of poles and the type of winding, diameter and length of the anchor, brushes and collector, additional losses in the armature winding, the calculation of switching and additional poles, the calculation of the magnetic circle and magnetization curve, the calculation of the excitation winding, losses and efficiency, the heat-output calculation, the calculation of the short-circuit current, the comparison of two embodiments of the armature winding: with laying of winding wire on rib in upper and lower part of groove (variant I) and flat side (variant II).

**Scientific novelty** - two variants of the armature winding in the upper and lower part of the groove, on the rib and flat hundred-rono were calculated and compared.

**Approbation of the results of the dissertation.** The results of the master's dissertation were published at the Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Modern Problems of Electrical Engineering and Automation" (Kyiv, 2021 and Kyiv, 2022).

**Publications:** The main results of the research are presented in 2 scientific works: Comparison of two options for conducting the windings of the traction DC motor for sequential excitation / A. Shymanska, M. Reutskyuyi, A. Rybalko // Науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Сучасні проблеми електроенерготики та автоматики», 9-13 грудня 2021 року, м. Київ, Україна. - С. 227-230; Evaluation of commutation and calculation of additional poles of the traction direct current motor / A. Shymanska, M. Reutskyuyi, A. Rybalko // Науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Сучасні проблеми електроенерготики та автоматики», 5-7 грудня 2022 року, м. Київ, Україна – send to publisher.

**Key words:** traction motor with serial excitation, trolleybus, armature winding, stator design, rotor design, thermal calculation.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень, термінів .....	10
Вступ.....	11
Розділ 1 Технічні умови.....	14
1.1 Технічні вимоги.....	14
1.1.1 Основні параметри та розміри.....	14
1.1.2 Характеристика .....	14
1.1.3 Комплектність .....	14
1.1.4 Маркування.....	15
1.2 Методи контролю.....	15
1.3 Вказівки по експлуатації .....	17
1.4 Висновки до розділу 1 .....	17
Розділ 2 Опис конструкції двигуна .....	18
2.1 Загальна конструктивна схема.....	18
2.2 Конструкція ротора.....	19
2.3 Конструкція статора.....	21
2.4 Конструкція колектору .....	24
2.5 Висновки до розділу 2 .....	24
Розділ 3 Основні розрахунки .....	26
3.1 Розрахункова потужність машини .....	26
3.2 Діаметр та довжина якоря .....	27
3.3 Розрахунок обмотки якоря.....	28
3.4 Розміри паза якоря .....	32
3.5 Розміри щіток та колектору .....	36
3.6 Довжина сердечника якоря та супротив обмотки якоря.....	38
3.7 Розрахунок додаткових витрат в обмотці якоря .....	39
3.8 Розрахунок комутації та додаткових полюсів.....	42
3.9 Розрахунок магнітного ланцюга та кривої намагнічування .....	45
3.10 Розрахунок обмотки збудження .....	52



3.11 Розрахунок втрат та ККД .....	53
3.12 Тепловий розрахунок .....	55
3.13 Розрахунок струму КЗ .....	58
3.14 Порівняння виконання двох варіантів обмоток двигуна .....	60
3.15 Висновки до розділу 3 .....	62
Розділ 4 Розробка стартап-проєкту .....	63
4.1 Опис ідеї стартап-проєкту .....	64
4.2 Технологічний аудит проєкту .....	65
4.3 Аналіз ринку та можливість старту проєкту .....	65
4.4 Розробка маркетингової програми стартапу .....	68
4.5 Висновки до розділу 4 .....	69
Загальні висновки .....	70
Перелік посилань .....	72
Додаток .....	73

**ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ**

- ДПС – двигун постійного струму;  
ОЯ – обмотка якоря;  
ОЗ – обмотка збудження;  
ЕМ – електрична машина;  
ТД – тяговий двигун;  
ТЕД – тяговий електродвигун;  
ЗІП – запасні інструменти, частини, приладдя;  
ПСД – обмотувальний дріт з двошаровими скло нитями;  
КО – компенсаційна обмотка;  
ЕРС – електрорушійна сила;  
МРС – магнітно-рушійна сила;  
ККД – коефіцієнт корисної дії;  
КЗ – коротке замикання;  
РР – режими роботи;  
ДД – демпфіруючий діод;  
ЛЧО – лобові частини обмотки;  
НШВФ – небезпечні та шкідливі виробничі фактори;  
ПОС – припої олов'яно-свинцевий;  
ГДК – гранично допустима концентрація;  
КПО – коефіцієнт природнього освітлення;  
ЛБ – люмінесцентна лампа білого світлу;  
ЛСП – лампа люмінесцентна промислова;  
ПУЕ – правила улаштування електроустановок;  
ДИП – димовий сповіщувач.

## ВСТУП

Безперервно зростаюча інтенсивність руху на міських магістралях відзначається високими уповільненнями при гальмуванні і прискореннями при пуску автотранспортних засобів. В цих умовах зростає вимога до технічного стану рухомого складу, перш за все до систем, що впливають на безпеку руху і електробезпечність. Незважаючи на те, громадський транспорт в сучасному місті виконує соціальні функції і вимога якісного обслуговування пасажирів домінує над економічними

показниками, безумовно, актуальною є мінімізація матеріальних і трудових витрат у сфері експлуатації при забезпеченні заданого рівня технічного стану рухомого складу. Важливу роль у вирішенні названих проблем грає конструкція рухомого складу, її подальшого вдосконалення. У сфері експлуатації рішення задач повинно

виконуватися шляхом вдосконалення системи технічного обслуговування і ремонту.

Все більш широке застосування знаходить малошумний безрейковий електричний транспорт-тролейбус. Який не забруднює атмосферу, долає з більшою швидкістю, в порівнянні з автобусом, круті підйоми, стабільно працює в зимовий час, що реалізує великі прискорення при пуску, що має плавне електричне гальмування. Для троллейбуса не потрібно дефіцитних рідких нафтопродуктів: він використовує електроенергію, для вироблення якої можна застосовувати низькосортні вугілля, гідроресурси, атомне "паливо" і т. д. Питоме споживання енергії троллейбусом на одного перевезеного пасажирів нижче на  $30 \div 35\%$ , ніж автобусом, а впровадження троллейбуса ДАК – 217Е з рекуперативним гальмуванням ще більше збільшує цю різницю [6].

Однак якість обслуговування населення громадським транспортом, в тому числі троллейбусом, не відповідає сучасним запитам. У числі причин такого положення-недостатні обсяги поставок троллейбусів, низька надійність деяких вузлів, недоліки в організації та управлінні рухом і т. д. найбільш істотна причину незадовільного обслуговування пасажирів-низька ефективність відновлення працездатності.

тності тролейбусів. В години "пік" відчувається гостра нестача машин, в той же час до 36% від загального обсягу тролейбусів простоює внаслідок технічних несправностей. Низький коефіцієнт випуску машин призводить до серйозних економічних втрат. Останні істотно зросли у зв'язку з різким збільшенням вартості сучасних тролейбусів, як ДАК-217Е [6].

Все це дозволяє вважати підвищення надійності вузлів тролейбуса при ремонті, що безпосередньо впливає на безпеку, надійність і економічність їх експлуатації, однією з найважливіших народно-господарських проблем, що має економічні та соціальні аспекти.

Ізоляція тягових електродвигунів працює в надзвичайно важких умовах. Двигуни розташовані під підлогою тролейбуса на відстані близько 200 мм від проїжджої частини. Забруднення, вода з хімічно активними речовинами, сіль, пісок в осінньо-зимовий час і пил в літній час захоплюються вентиляторами двигуна і осідають разом з продуктами зносу колекторно-щіткового вузла на обмотках, ізоляторах, проводах. Інтенсивне внутрішнє зволоження ізоляції продовжується і в непрацюючих двигунах. В період охолодження двигуна тиск в порах і капілярах ізоляції трохи нижче атмосферного.

Волога проникає в найдрібніші пори і капіляри, що активізує і прискорює процеси старіння і руйнування ізоляції. Забруднюються вентиляційні канали, внаслідок чого порушується тепловий режим обмоток. Зазначені негативні моменти діють спільно з неперервними коливаннями струмів і напруги, в тому числі перенапруги. Найбільш важкі наслідки викликаються пробоем ізоляції між двома секціями якоря, що лежать в одному пазу в двох шарах. В цьому випадку замкнутою накоротко виявляється половина всієї обмотки якоря, в зв'язку з чим у всіх секція короткозамкненою обмотки створюється значний струм. В результаті виникає круговий вогонь по колектору, а також значний гальмівний момент, різко знижує обертальний момент на валу двигуна.

З точки зору електробезпеки тролейбус є унікальним об'єктом техніки, так як незважаючи на підвищений напруги (600 В), корпус тролейбуса не має заземлення і ізольований від землі гумовими шинами. В умовах, коли йде постійне хитання корпусу машини пасажирями при посадці і висадці, попадання високого

потенціалу на корпус тролейбуса представляє надзвичайну небезпеку, іноді закінчується навіть смертельними випадками. Тому забезпечення високоякісного ремонту, що дозволяє уникнути випадків ураження електричним струмом пасажирів і персоналу, є для тролейбусного транспорту проблемою виключно важливий [5].

Вибір теми дипломного проекту обумовлений необхідністю поліпшення параметрів приводу після капітального ремонту тролейбусів. Систематичні виходи з ладу тролейбусів ДАК-217Е і відсутність технічних розрахунків, надали підстави припустити, що електропривід тролейбуса спроектований з істотними упущеннями. Через це в дипломному проекті було виконано електромагнітний та тепловий розрахунок двигуна. При вдосконаленні конструкції була врахована неможливість зміни розмірів магнітопровода та зміна колектору.

## РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНІ УМОВИ

### 1.1 Технічні вимоги

#### 1.1.1 Основні параметри та розміри

Номінальні дані двигуна	
Номінальна напруга, В	600
Номінальна (часова) потужність, кВт	150
Номінальний струм, А	275
Номінальне ККД	0.91
Номінальна швидкість обертання, об/хв	1480

#### 1.1.2 Характеристика

Характеристики двигуна повинні забезпечити швидкість тролейбуса при годинному режимі роботи 30 км / год при номінальній годинній потужності двигуна  $P_H=150$  кВт. Усталена швидкість тролейбуса - 60 км/год. Маса тролейбуса при нормальному наповненні-16 т.

Двигун ТН-81 допускає наступні граничні відхилення характеристик:

Максимальна напруга, В	720
Мінімальна напруга, В	400
Максимальний струм пуску, А	540
Максимальний струм гальмування, А	480
Максимальна швидкість обертання, об/хв	3200
Мінімальна ступінь збудження, %	40

#### 1.1.3 Комплектність

Двигун поставляється в складі тролейбуса з повним комплектом документації з експлуатації та ремонту, паспортом, технічним описом і габаритним кресленням.

Запчастини до двигуна по відомості ЗІП містять повний комплект зрівняльних з'єднань (23 шт.) і повний комплект секцій обмотки (46 шт.).

### **1.1.4 Маркування**

Маркування затискачів для зовнішнього з'єднання наноситься способом, що забезпечує її довговічність і стійкість до атмосферних впливу. Кожен двигун забезпечується прикріпленою на видному місці табличкою, на якій вказують:

- товарний знак підприємства-виробника;
- найменування виробу;
- заводський номер;
- умовне позначення типу;
- дату виготовлення;
- номінальна потужність;
- номінальна напруга;
- спосіб збудження;
- номінальну частоту обертання;
- номінальний струм;
- номінальний ККД;
- клас ізоляції двигуна;
- ступінь номінального збудження;
- повну масу двигуна, кг;
- ступінь захисту.

Маркування місць заземлення повинна бути виконана по одному з методів ГОСТ 21130-85 .

### **1.2 Методи контролю**

У стані поставки ізоляція двигуна повинна витримувати випробувальну напругу 3380 В протягом 1 хв. при повторних іспитах, напруга повинна бути зменшена до 80% від цього значення.

При максимальній швидкості 3200 об/хв власні вібрації двигуна не повинні перевищувати 7.5 мм/с.

Опір корпусних ізоляції має бути не менше 2 МОм.

Ізоляція між витками котушок повинна витримувати випробувальну напругу 780 В протягом 5 хв.

Післяремонтні випробування включають:

- контроль настановних і приєднувальних розмірів;
- контроль опору ізоляції щодо корпусу;
- випробування підвищеною напругою промислової частоти 3350 В при повній заміні і  $0.8 \times 3850$  В при частковій заміні обмоток протягом 1 хв;
- контроль положення щіток на лінії геометричної нейтралі;
- випробування міжвиткової ізоляції котушок напруга 780 В протягом 5 хв;
- визначення опору обмотки в холодному стані методом амперметра вольтметра або одинарним мостом: опір обмотки якоря має бути порядку 0.0251 Ом, обмотки збудження - 0.0263 Ом і обмотки додаткових полюсів - 0.01355 Ом, приведені до температури 25 °С;
- випробування двигуна при навантаженні в номінальному режимі протягом 60 хв;
- випробування при підвищеній частоті обертання при 4000 об / хв протягом 2 хв;
- перевірка комутації двигуна при роботі на:

Напруга	Струм	Ступінь збудження
720 В	540 А	100%
720 В	270 А	78%
720 В	250 А	40%

Допускається ступінь іскріння 1.5 (на 540 А – ступінь іскріння 2);

- вимірювання рівня вібрації при максимальній швидкості 3200 об / хв; вимірювання проводиться механічним або електричним віброметром; методи контролю здійснюються згідно ГОСТ 10159-79 .



### 1.3 Вказівки по експлуатації

Приводний ДПС ТН-81 призначений для приводу тролейбуса ДАК-217Е і розрахований на експлуатацію при висоті над рівнем моря не більше 1200 м; при температурі повітря від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  і відносної вологості повітря не більше 95% при  $20^{\circ}\text{C}$ . номінальний режим експлуатації - S1. Клас нагрівостікості ізоляції - F. згідно СТАС 5679/1-79 гранично допустима температури обмотки якоря -  $+140^{\circ}\text{C}$ , обмотки статора -  $+155^{\circ}\text{C}$ , колектору-  $+105^{\circ}\text{C}$ .

Ступінь захисту двигуна- IP20 з самовентиляцією при подачі повітря з боку колектору.

Розрахунковий номінальний режим роботи - 60 хв.

### 1.4 Висновки до розділу 1

Україна посідає друге місце у світі по кількості тролейбусних систем, через це модернізація тягових двигунів є важливим кроком для розвитку усієї системи.

Тому основними задачами для дослідження є:

- здійснити аналіз загальної конструкції двигуна ТН-81, конструкції статора, ротора та колектору;
- розрахувати потужність машини, діаметр та довжину якоря, розміри паза та обмотку якоря;
- розрахувати розміри щіток та колектора;
- розрахувати додаткові втрати в якорі; здійснити розрахунок комутації та додаткових полюсів;
- розрахувати обмотку збудження; здійснити тепловий розрахунок;
- порівняти два варіанти виконання обмотки якоря: з укладкою обмоткового дроту на ребро у верхній і нижній частині паза (варіант I) та плоскою стороною (варіант II);
- зробити висновки по роботі.

## РОЗДІЛ 2

### ОПИС КОНСТРУКЦІЇ ДВИГУНА

#### 2.1 Загальна конструктивна схема

У двигуні постійного струму ТН-81 послідовного збудження з самовентиляцією, продування повітрям виконується завдяки двом отворам у корпусі з захисними решітками, які очищають при обслуговуванні. Повітря поступає до машини зі сторони колектора, через отвори між валом та колектором та повздож якоря. Кріплення двигуна до рами тролейбуса виконується завдяки 3 кронштейнам, два знаходяться на щітку зі сторони кардана там один на іншій стороні.

Загальна конструкція тягового двигуна складається з:

1. Статор;
2. Ротор;
3. Колектор;
4. Вентилятор;
5. Щіткотримач;
6. Фільтр;
7. Колекторний щіток;
8. Тяговий щіток;
9. Роликовий підшипник;
10. Шариковий підшипник.[11]

Маса двигуна складає 1290кг. Радіальне биття колектору - 0.01 мм. Матеріалом валу є сталь 40СГ10. Січення вивідних кабелів - 50 мм<sup>2</sup>. Осьовий зазор ротора після зборки складає 0.4 мм. Обмотки двигуна проходять просочення у кремені органічному лаку марки КО-916К за допомоги вакууму.

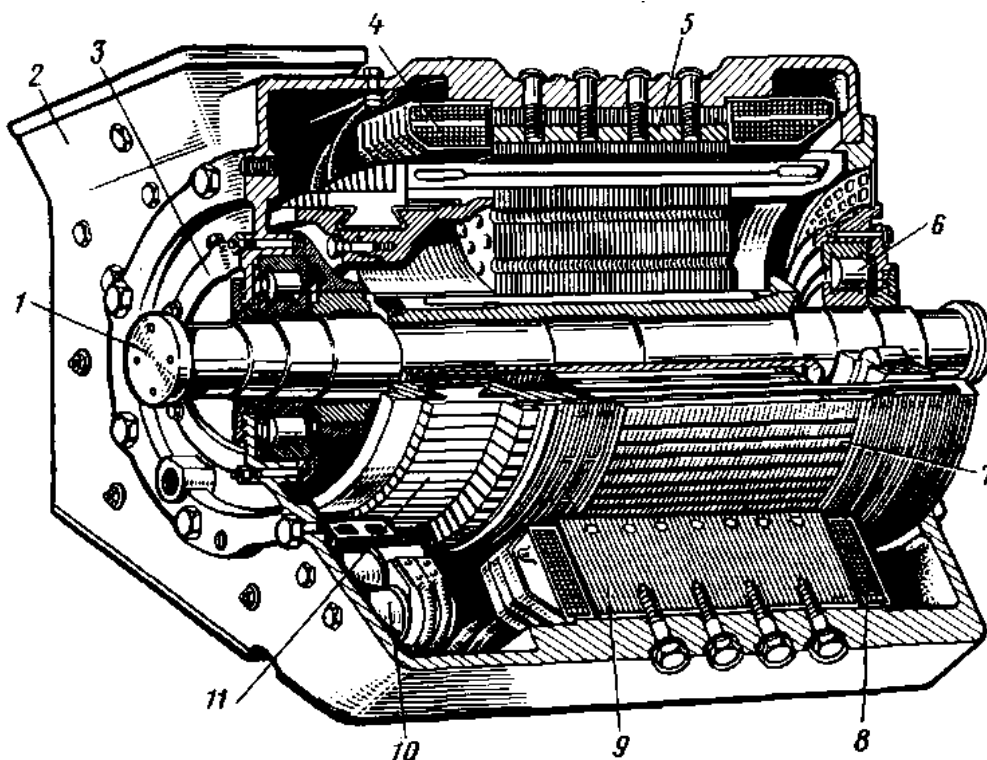


Рисунок 2. 1 Конструкція двигуна

## 2.2 Конструкція ротора

Якір двигуна містить 46 пазів розміром  $34.4 \times 11.6 \times 10.2$  мм. Число елементарних пазів в одному реальному-5. Число паралельних проводів-2. Число витків в секції-1. Крок обмотки по пазах-11. Провід, застосований для виготовлення котушок обмотки якоря - прямокутного профілю, ізолюваний емаллю і двома шарами скловолокна. Клас ізоляції-F.

Для кращого використання магнітного ланцюга ротора паз має ступінчасту форму. Тому для верхніх і нижніх сторін секцій використовують два розміри обмотувального проводу: верхні сторони роторної котушки виконуються з двох паралельних проводів  $1.4 \times 5$  мм<sup>2</sup> (ізолюваний- $1.91 \times 5.51$  мм<sup>2</sup>), а нижня-з двох паралельних проводів  $1.12 \times 6.3$  мм<sup>2</sup> (ізолюваний -  $1.66 \times 6.84$  мм<sup>2</sup>).

Котушка замикається шляхом послідовного з'єднання зі сторони, протилежної колектору, двох проводів  $1.4 \times 5$  мм, відповідно верхнього шару, з двома проводами  $1.12 \times 6.3$  мм, відповідно нижнього шару, за допомогою муфт з мідного листа товщиною 0.5 мм. Кожна котушка має 5 секцій, кожна по одному витку.

Хомути для послідовного з'єднання схеми простий петльової обмотки, є двотиповими: маленькі Хомути, використовувані для витків без зрівняльних з'єднань, і великі Хомути. Кожна роторна котушка, що має 5 секцій, містить великий хомут в середній секції для приєднання зрівняльних з'єднань.

Зрівнювальні з'єднання простий петльової обмотки з'єднують точки, що мають однаковий потенціал. Число зрівняльних з'єднань обмотки, покладеної в 46 пазів, дорівнює 23. Найбільше можливе число зрівнювачів для обмотки такого типу дорівнює  $K/a = 230/2 = 115$ , так як кожен секцію в межах однієї пари гілок можна з'єднати з відповідними секціями в межах інших пар паралельних гілок. Такі машини називаються машинами в повним числом зрівнювачів. Але при цьому великий витрата міді і ускладнюється конструкція машина. У рівно секційних обмотках досить виконати по одному зрівнювачу на паз. В даному випадку число зрівнювачів дорівнює 23. Підключення зрівнювачів здійснюють з боку, протилежної колектору (рис . 2.5). Зрівнювачі розташовані під головкою котушки обмотки якоря. Зрівнювачі виконані з мідного дроту такого ж типу, що і верхні сторони котушки.

Використання двох сортamentів обмотувального дроту, необхідність пайки лобових частин обмотки сильно здорожує технологію ремонту двигуна. Тому був розглянутий другий варіант виконання більш технологічної обмотки з використанням одного типорозміру обмоточного проводу  $1.9 \times 7.1$  мм (з ізоляцією  $2.34 \times 7.37$  мм), вкладені в паз плазом. В з'являється просвіт у верхній частині паза укладається ізолювана мідна шина, що грає роль пазового глушителя або магнітного демпфера. Відомо, що основна частина індуктивності розсіювання короткозамкненого контуру обмотки при комутації доводиться на пазову частину обмотки. Ця частина розсіювання може бути знижена за допомогою пазових глушників у вигляді мідних екранів, закладених всередину паза паралельно з обмоткою по всій довжині пазів. Під час комутації в глушниках виникають додаткові струми, котрі зменшують реактивну ЕРС і глушать різкі скачки поля розсіювання комутуваної секції, не скомпенсовані комутуючим полем.

Пазові глушники у вигляді мідних провідників були запропоновані у 1921 р. К. Н. Шенфером. Так як ці глушники обтикаються індукованим струмом не тільки в періоди комутації, але і в інший час, то вони збільшують втрати в машині.

### 2.3 Конструкція статора

Статор складається з сталевого литого корпусу, що має в поперечному перетині форму квадрата, всередині якого монтуються чотири головних і чотири допоміжних полюса (Рисунок 2. 2).

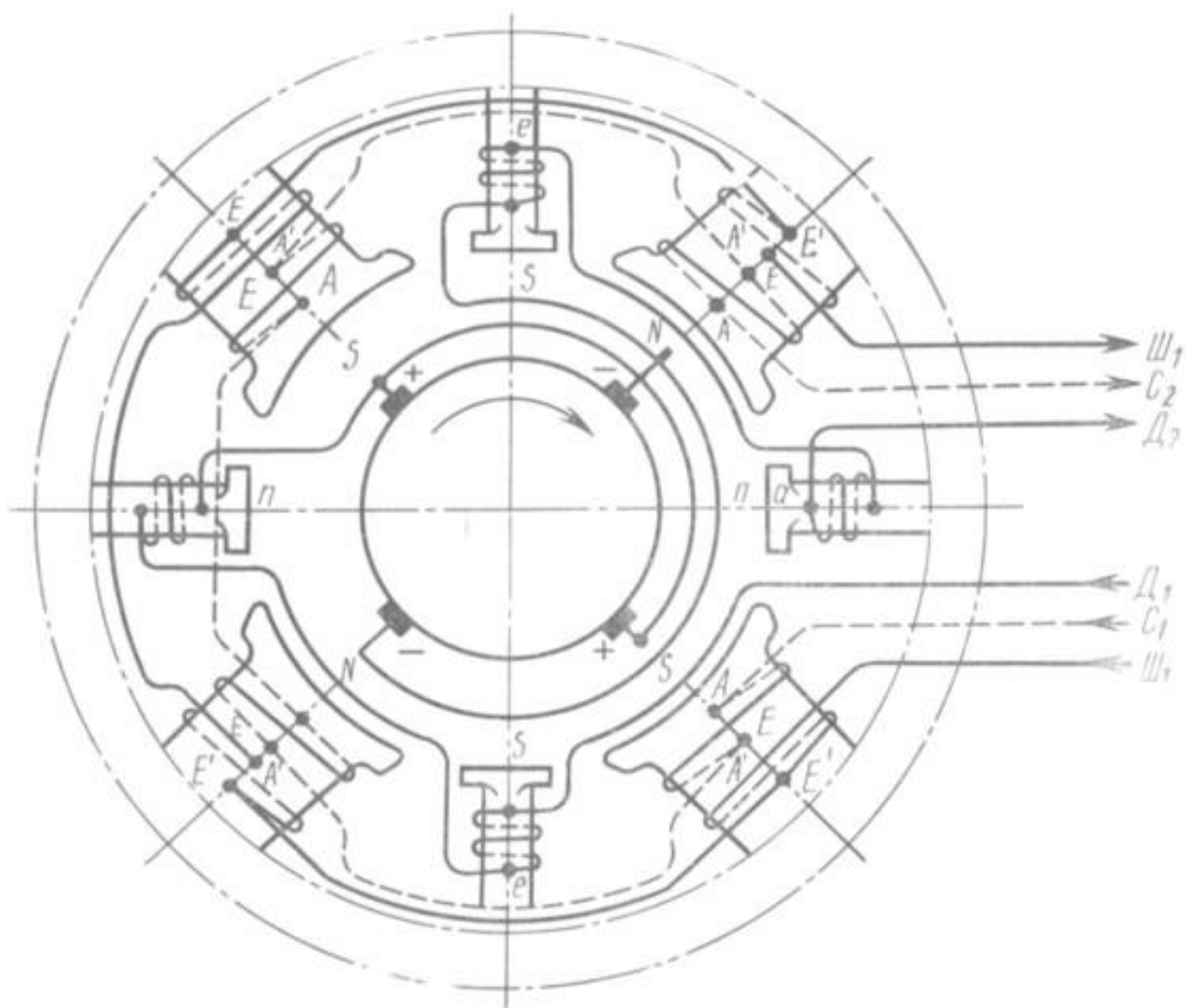


Рисунок 2. 2 Розміщення полюсів в статорі

Головні полюси з послідовною обмоткою збудження монтуються по вертикальній і горизонтальній осях статора, а допоміжні полюса з обмотками монту-

ються на діагоналях квадрата. Контур послідовного збудження складається з двох паралельних гілок: полярні котушки по дві з'єднуються послідовно (Рисунок 2. 3). Котушки мотають з мідної неізолюваної шини розміром  $2 \times 20$  мм". Намотування ведеться плазом в дві котушки, що містять 24 і 26 виток. Міжвитковою ізоляцією служить мікафолія товщиною 0.22 мм і шириною 22 мм.

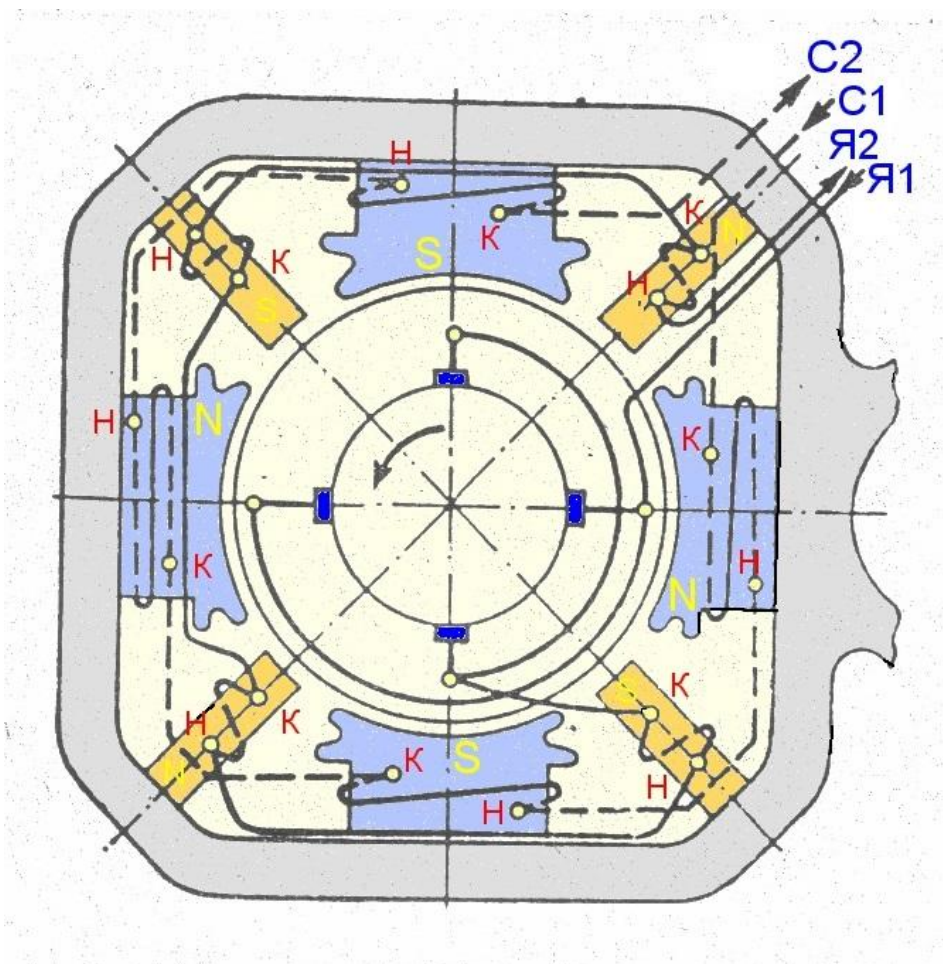


Рисунок 2. 3 Схема електричних з'єднань

Для поліпшення комутації в машині встановлені чотири додаткових полюса, обмотки яких включені послідовно. Котушка додаткових полюсів намотані на ребро з мідної шини розміром  $4 \times 20$  мм і містять 16 витків. Міжвитковою ізоляцією служить мікафолій товщиною 0.18 мм.

Намагнічує сила додаткових полюсів спрямована зустрічно з намагнічує силою реакції якоря, внаслідок чого розсіювання додаткових полюсів значно більше, ніж розсіювання основних потоків. Для зменшення потокозчеплення розсіювання додаткових полюсів їх обмотку розташовують по можливості ближче до

якоря і повітряний зазор ділять на дві частини-зазор між якорем і наконечником додаткового полюса і зазор між сердечником додаткового полюса і ярмом. Заповнюючи останній прокладками з немагнітного матеріалу. Збільшений додатковий зазор в цепі додаткових полюсів дозволяє у усіх режимах роботи зберігати магнітну ланку додаткових полюсів ненасиченою, так як у такому випадку індукція в полюсі буде змінюватись пропорційно струму в якорі і лінійно навантаженню.

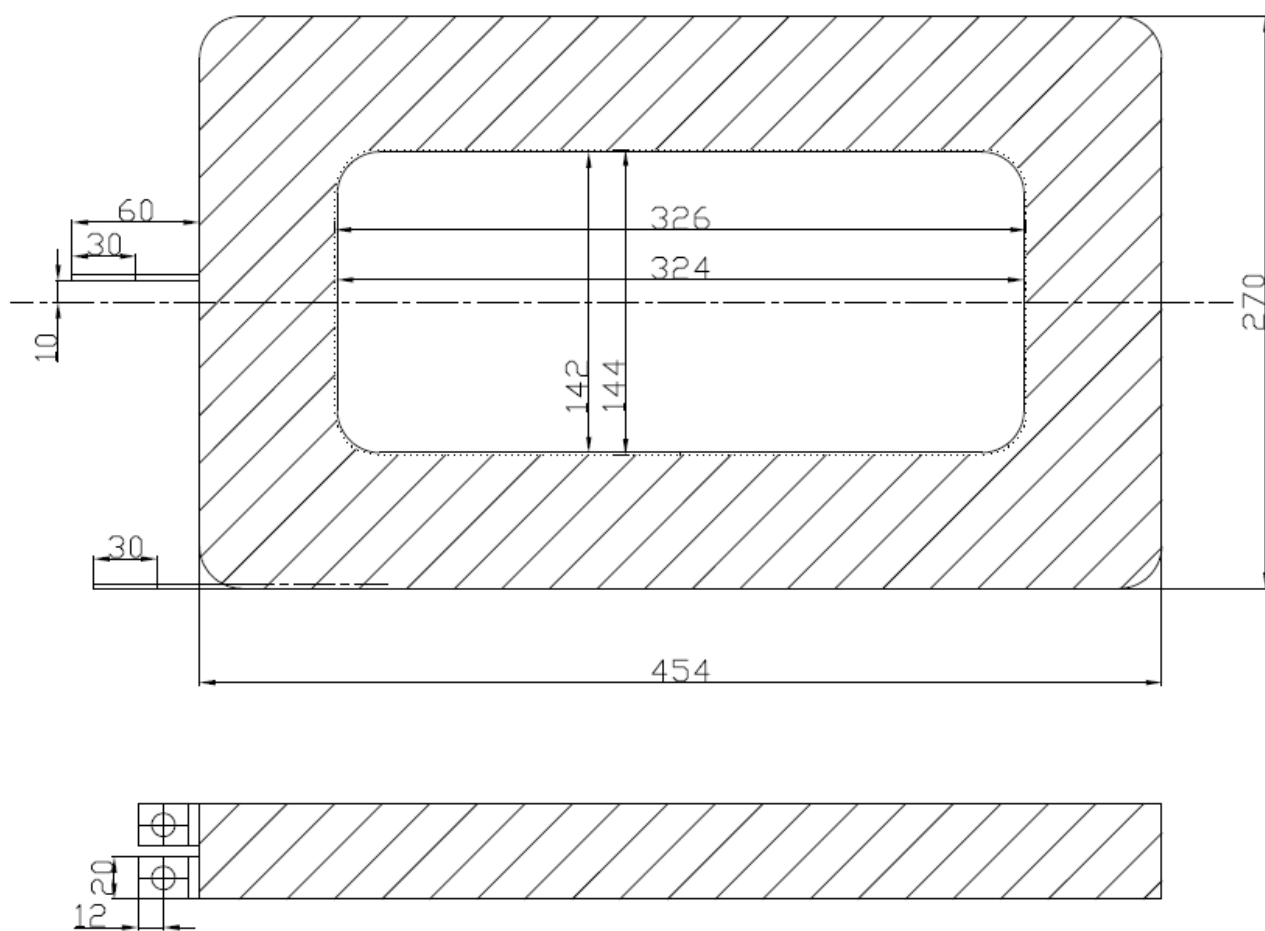


Рисунок 2. 4 Котушка головного полюса

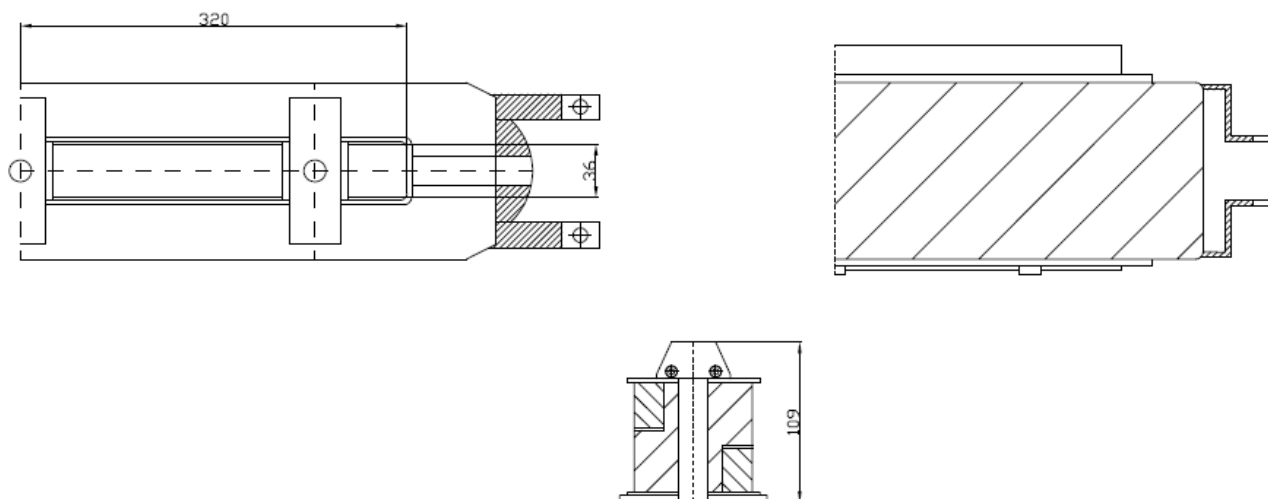


Рисунок 2. 5 Додатковий полюс

## 2.4 Конструкція колектору

Колектор двигуна містить 230 пластин із мідь-срібло сплаву. Вміст срібла складає 0.08-0.12%. Характеристика сплаву:

- Міцність – 95 НВ;
- Провідність – 57 см/мм<sup>2</sup>;
- Щільність – 8.9 г/мм<sup>2</sup>;
- Термічна провідність – 3.9 Дж/см\*К;
- Температура змочування – 350 °С;
- Коефіцієнт теплового розширювання –  $17.7 \cdot 10^{-6}$  1/К;
- Товщина ізоляції пластин міканітом – 0.9 мм.

Для чотирьох щіткотримачів з щітками точну фіксацію на лінії геометричної нейтралі забезпечують траверси щіткотримачів. Марка щіток – EG 845. Кількість щіток на двигуні складає 12. На кожному щіткотримачі розміщені три щітки, розміри яких складають 16\*32\*40 мм<sup>2</sup>.

## 2.5 Висновки до розділу 2

У даному розділі були наведені конструкції ротора, статора, колектору та загальна конструкція двигуна. Наведені дані та розміри цих елементів двигуна.





### РОЗДІЛ 3 ОСНОВНІ РОЗРАХУНКИ

$$P_n = 150 \text{ кВт}$$

$$U_n = 600 \text{ В}$$

$$\eta_n = 0.91$$

$$n_n = 1480 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$$

$$n_{\text{max}} = 3200 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$$

$$I_n = 275 \text{ А}$$

$$I_{\text{maxp}} = 540 \text{ А}$$

$$U_{\text{max}} = 702 \text{ В}$$

$$U_{\text{min}} = 400 \text{ В}$$

#### 3.1 Розрахункова потужність машини

КПД двигуна (по умові):

$$\eta_n = 0.91$$

Струм якоря двигуна, А:

$$I_a = \frac{P_n \cdot 10^3}{U_n \cdot \eta_n} = \frac{150 \cdot 10^3}{600 \cdot 0.91} = 274.725$$

Падіння напруги у якірному ланцюгу:

$$n' = 1000$$

$$P' = P_n \cdot \frac{n'}{n_n} = 150 \cdot \frac{1000}{1480} = 101.351$$

$$K'_e = 7.4 \cdot 10^{-2}$$

$$K_e = K'_e \cdot \frac{n'}{n_n} = 7.4 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1000}{1480} = 0.05$$

ЕРС при номінальному навантаженні, В:

$$E_n = U_n \cdot (1 - K_e) = 600 \cdot (1 - 0.05) = 570$$

Розрахункова потужність двигуна, кВт:

$$P_{em} = E_n \cdot I_n \cdot 10^{-3} = 570 \cdot 275 \cdot 10^{-3} = 156.75$$

### 3.2 Діаметр та довжина якоря

Діаметр якоря:

$$D_a = 36 \text{ см}$$

Число полюсів:

$$p = 2$$

$$2p = 4$$

Окружна швидкість обертання:

1. Номінальна:

$$V_{an} = \frac{\pi \cdot D_a \cdot 10^{-2} \cdot n_n}{60} = \frac{\pi \cdot 36 \cdot 10^{-2} \cdot 1480}{60} = 27.9 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

2. Максимальна:

$$V_{amax} = \frac{\pi \cdot D_a \cdot 10^{-2} \cdot n_{\max}}{60} = \frac{\pi \cdot 36 \cdot 10^{-2} \cdot 3200}{60} = 60.32 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Полюсне ділення:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a}{2p} = \frac{\pi \cdot 36}{2 \cdot 2} = 28.27 \text{ см}$$

Струм, який приходить на скобу:

$$I_{\text{бр}} = \frac{I_n}{p} = \frac{275}{2} = 137.5 \text{ А}$$

Частота перемагнічування при частоті обертання:

1. Основна:

$$f_{1n} = \frac{p \cdot n_n}{60} = \frac{2 \cdot 1480}{60} = 49.33 \text{ Гц}$$

2. Максимальна:

$$f_{1\text{max}} = \frac{p \cdot n_{\text{max}}}{60} = \frac{2 \cdot 3200}{60} = 106.67 \text{ Гц}$$

Коефіцієнт використання:

$$C = \frac{\alpha \cdot A \cdot B}{6 \cdot 10^7} = \frac{0.665 \cdot 280 \cdot 0.835}{6 \cdot 10^7} = 2.59 \times 10^{-6} \frac{\text{кВт}}{\left(\frac{\text{об}}{\text{хв}}\right) \cdot \text{см}^3}$$

де

$A = 280 \text{ А/см}$  – лінійне навантаження;

$B = 0.835 \text{ Тл}$  – індукція у повітряному зазорі;

$\alpha = 0.665$  – коефіцієнт перекриття полюсного кроку для реальної конструкції.

Розрахункова довжина сердечника якоря, см

$$l_0 = \frac{P_{\text{ем}}}{n_n \cdot D_a^2 \cdot C} = \frac{156.75}{1480 \cdot 36^2 \cdot 2.55} = 31.5$$

Довжина реального сердечника якоря, см:

$$l_0 = 32$$

### 3.3 Розрахунок обмотки якоря

Лінійне навантаження, А:

$$A = 280$$

Кількість паралельних віток простої петльової обмотки якоря:

$$2a = 4$$

Струм у паралельній гілці, А:

$$I_p = \frac{I_a}{2a} = \frac{275}{2 \cdot 2} = 68.75 \quad I_a = 275$$

Число провідників ОЯ:

$$N = \frac{\pi \cdot D_a \cdot A}{I_p} = \frac{\pi \cdot 36 \cdot 280}{68.75} = 460.61$$

Приймаємо  $N=460$

Число провідників у пазу:

$$\frac{Z}{2p} \geq 13.5$$

$$u = 5$$

$$w_c = 1$$

$$s_{\Pi} = 2u \cdot w_c = 2 \cdot 5 = 10$$

Об'єм струму в пазу, А:

$$s_{\Pi} \cdot I_p = 10 \cdot 68.75 = 687.5$$

Укладку провідників в пази можна виконати двома способами, які зображені на Рисунок 3. 1. Варіант а відповідає укладці у серійному двигуні, варіант б є запропонованим з більш технологічною схемою, яка не потребує пайки лобових частин.

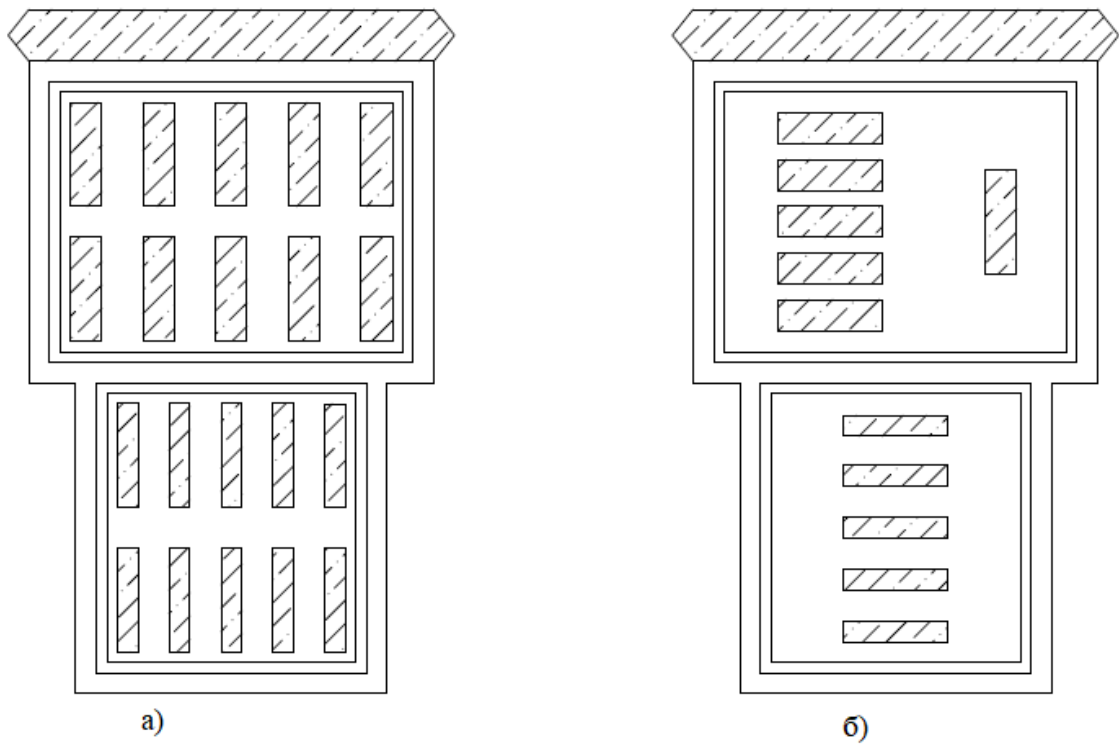


Рисунок 3. 1 Розташування провідників у пазу:

а) на ребро

б) пластом

Не перевищує допустимого значення 2000 А.

Кількість пазів:

$$Z = \frac{N}{s_{\Pi}} = \frac{460}{10} = 46$$

Кількість колекторних пластин:

$$K = u \cdot Z = 5 \cdot 46 = 230$$

Кількість провідників ОЯ:

$$N_{\Gamma} = 2 \cdot w_c \cdot K = 2 \cdot 230 = 460$$

Діаметр колектору:

$$D_k = 32$$

Колекторне ділення:

$$\beta_k = \frac{\pi D_k}{K} = \frac{\pi \cdot 32}{230} = 0.44$$

Окружна швидкість обертання:

1. Номінальна частота обертання м/с:

$$\omega_{kn} = \frac{\pi D_k \cdot 10^{-2} \cdot n_n}{60} = \frac{\pi \cdot 32 \cdot 10^{-2} \cdot 1480}{60} = 24.8$$

2. Максимальна частота обертання м/с:

$$\omega_{kmax} = \frac{\pi D_k \cdot 10^{-2} \cdot n_{max}}{60} = \frac{\pi \cdot 32 \cdot 10^{-2} \cdot 3200}{60} = 53.62$$

Середня напруга між сусідніми колекторними пластинами, В:

$$e_{ksr} = \frac{2p \cdot U_n}{K} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 600}{230} = 10.43$$

У двигуні відсутня КО, тому необхідно перевірити максимальну напругу між сусідніми колекторними пластинами. Коефіцієнт викривлення поля дорівнює:

$$K_n = 2$$

$$e_{kmax} = \frac{2p \cdot U_n \cdot K_n}{K \cdot \alpha} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 600 \cdot 2}{230 \cdot 0.665} = 31.38$$

Умовна різниця потенціалів між ходами:

$$\Delta e = \frac{u \cdot e_{ksr}^2}{U_n \cdot \alpha^2} = \frac{5 \cdot 10.434782608695652^2}{600 \cdot 0.665^2} = 2.05$$

Кількість пазів на полюс:

$$\frac{Z}{2p} = \frac{46}{2 \cdot 2} = 11.5$$

Умовна симетрія:

$$\frac{Z}{p} = 23$$

$$\frac{K}{p} = \frac{230}{2} = 115$$

Крок по колектору та результуючий крок для простої петльової обмотки:

$$y_k = y = 1$$

Перший частковий крок обмотки:

$$y_1 = \frac{K}{2p} - \epsilon_k = \frac{230}{2 \cdot 2} - 2.5 = 55$$

Другий:

$$y_2 = y_1 - y = 55 - 1 = 54$$

Крок по пазам:

$$y_{II} = \frac{y_1}{u} = \frac{55}{5} = 11$$

Крок зрівнювального з'єднання :

$$y_{ур} = \frac{K}{p} = \frac{230}{2} = 115$$

Найбільш можлива кількість зрівнювачів дорівнює  $\frac{K}{a} = 115$ . Машини з такою кількістю зрівнювачів називаються машинами з повною кількістю зрівнювачів. При цьому витрати міді зростають, також ускладнюється конструкція. У рівносекційних обмотках виконується один зрівнювач на паз. Тому кількість зрівнювачів для нашої обмотки:

$$\frac{K}{a \cdot u} = \frac{230}{2 \cdot 5} = 23$$

### 3.4 Розміри паза якоря

Для ОЯ обираємо ізоляцію «ізофлекс» з температурним індексом F.

У якості обмотки обираємо дріт марки ПСД. Для зменшення додаткових витрат активні провідники ОЯ розділені по висоті на два. Розмір обмотувального дроту вкладеного на ребро :

- Верх пазу:

$$c \cdot \frac{b \cdot h = q}{b_{iz} \cdot h_{iz}} = 2 \cdot \frac{1.4 \cdot 5 = 6.78}{1.91 \cdot 5.51}$$



- Низ пазу:

$$c \cdot \frac{b \cdot h = q}{b_{из} \cdot h_{из}} = 2 \cdot \frac{1.12 \cdot 6.3 = 6.84}{1.66 \cdot 6.84}$$

Повна висота дроту у пазу, мм:

$$2 \cdot (5.51 + 6.84) = 24.7$$

Середнє січення провідника ОЯ, мм<sup>2</sup>:

$$q_c = c q_{cp} = 2 \cdot \frac{6.78 + 6.84}{2} = 13.62$$

Другий варіант укладки провідника у пазу (плазом), при цьому обмотка становиться більш технологічною, не потребує пайки лобових частин, а в верхню частину пазу укладаються пазові демпфери, які виконуються з мідних провідників. Під час комутації у демпферах виникають додаткові струми, які зменшують реактивну ЕРС та демпфірують різкі стрибки поля розсіювання, які не були скомпенсовані комутуючим полем, комутованою секцією.

Розміри обмотувального дроту, укладаються плазом зверху та знизу пазу, однакові та рівні:

$$c \cdot \frac{b * h = q}{b_{из} * h_{из}} = \frac{1.9 * 7.1 = 13.13}{2.34 * 7.37}$$

Січення провідників ОЯ, мм<sup>2</sup>:

$$q_{Cu} = c \cdot q = 13.13$$

Два варіанти виконання ОЯ – дротом, підрозділеним по висоті на два провідника та укладеним в паз на ребро (серійний двигун, варіант 1) та дротом, укладеним плазом, з пазовими демпферами (варіант 2, запропонований). Шаг по пазам у обох варіантах буде 11.

Щільність струму в ОЯ:

Варіант 1, А/мм<sup>2</sup>:

$$j_{a1} = \frac{I_p}{q_c} = 5.05$$

Варіант 2, А/мм<sup>2</sup>:

$$j_{a2} = \frac{I_p}{q_{Cu}} = 5.24$$

Фактор нагріву:

Варіант 1, А/см\*мм<sup>2</sup>:

$$j_{a1} \cdot A = 1413.363$$

Варіант 2, А/см\*мм<sup>2</sup>:

$$j_{a2} \cdot A = 1466.11$$

Гільзова ізоляція буде використана, через те що довжина сердечника якоря складає  $l_0 = 32$  см, що не перевищує 60 см. При  $u = 5$  загальна товщина ізоляції з врахування припусків на укладку складає:

Варіант 1, мм:

По ширині пазу: верх – 1.65; низ – 1.5;

По висоті пазу: верх – 3.96; низ- 3.96.

Варіант 2, мм:

По ширині пазу – 2.4;

По висоті пазу – 6.3.

Розміри пазу задані конструкцією машини та складають, мм:

Для верхньої частини:  $b_1 * h_1 = 11.6 * 15$ ;

Нижньої частини:  $b_2 * h_2 = 10.2 * 15$ .

Розміри секції з ізоляцією, мм:

Варіант 1: верх -  $b * h = 11.2 * 13$ ; низ -  $b * h = 9.8 * 13.7$ ;

Варіант 2:  $b * h = 9.47 * 13.85$ .

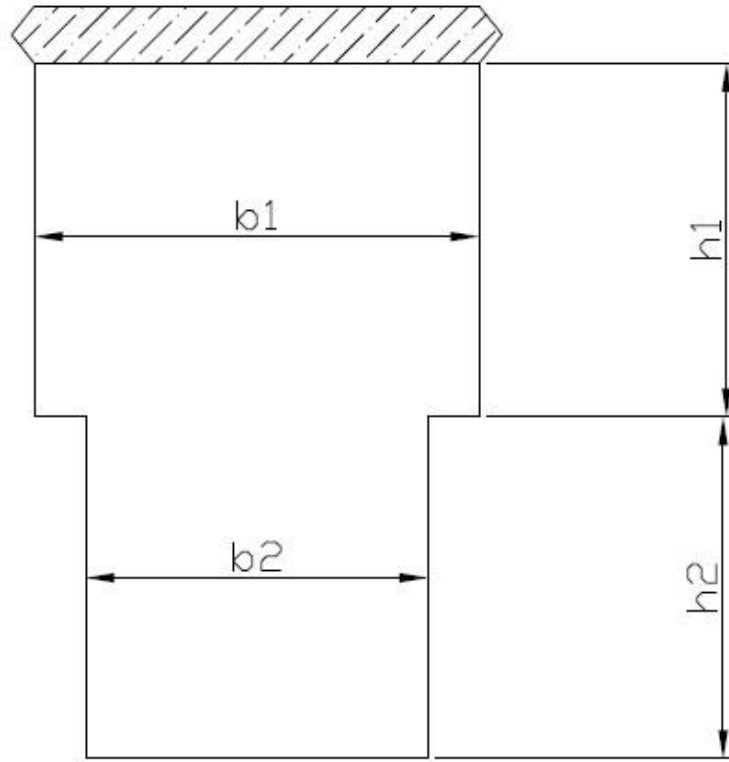


Рисунок 3. 2 Паз якоря двигуна

Для визначення висоти клину слід знайти погону масу міді на 1 см довжини пазу, кг/см:

Варіант 1:

$$m_{Cu1} = s_{\Pi} \cdot \rho_{Cu} \cdot 8.9 \cdot 10^{-5} = 12.12 \cdot 10^{-3}$$

Варіант 2:

$$m_{Cu2} = s_{\Pi} \cdot \rho_{Cu} \cdot 8.9 \cdot 10^{-5} = 11.68 \cdot 10^{-3}$$

Погона маса ізоляції, кг/см:

$$m_{из} = 2.5 \cdot 10^{-5} \cdot (b_{\Pi} \cdot h_{\Pi} - s_{\Pi} \cdot \rho_{Cu}) = 2.5 \cdot 10^{-5} \cdot (30 \cdot 11 - 10 \cdot 13.13) = 5 \times 10^{-3}$$

Відцентрова сила, діюча на 1 см вмісту паза, Н/см:

$$C_{\Pi} = 55 \cdot (m_{Cu1} + m_{из}) \cdot (D_a - 0.1b_{\Pi}) \cdot \left( \frac{1.2n_{max}}{1000} \right)^2 = 55 \cdot (12.12 \cdot 10^{-3} + 0.0049675) \cdot (36 - 0.1 \cdot 30) \cdot \left( \frac{1.2 \cdot 3200}{1000} \right)^2 = 457.32$$

Мінімальна товщина клину, см:

$$h_k = 1.22 \cdot \sqrt{\frac{0.1 \cdot b_{\Pi} \cdot C_{\Pi}}{\sigma_{\text{доп}}}} = \frac{27.5}{\sqrt{\sigma_{\text{доп}}}}$$

де  $\sigma_{\text{доп}}$  для різних матеріалів:

Матеріал	$\sigma_{\text{доп}}$	Мінімальна товщина клинів
Гетинакс В	2450	0.56
Текстоліт ПТК	3450	0.47
Склотекстоліт СТ-1	5250	0.38

Оскільки висота пазу під клином дорівнює 4.4 мм, приймаємо, клин із склотекстоліту товщиною 4 мм. [7]

Коефіцієнт заповнення пазу:

$$K_{\Pi} = \frac{c \cdot s_{\Pi} \cdot q_c}{b_{\Pi} \cdot h_{\Pi}} = \frac{10 \cdot 13.620000000000001}{30 \cdot 11} = 0.41$$

Ширина зубців при ступінчастому пазі:

$$b_{zx} = \frac{\pi \cdot (D - h_x \cdot K)}{Z} - b_{\Pi}$$

де  $h_x$  – глибина, на якій визначається ширина зубців;

$K = 0$  або  $K = 2$ .

$$b_{z\text{max}} = \frac{\pi \cdot 360}{46} - 11.6 = 13 \text{ мм}$$

$$b'_{z\text{ср}} = \frac{\pi \cdot (360 - 40)}{46} - 11.6 = 10.25 \text{ мм}$$

$$b''_{z\text{ср}} = 21.8 - 10.2 = 11.6 \text{ мм}$$

$$b_{z\text{min}} = \frac{\pi \cdot (360 - 70)}{46} - 10.2 = 9.6 \text{ мм}$$

### 3.5 Розміри щіток та колектору

Діаметр колектору:  $D_K = 32$  см

Розміри щіток, см:  $b_{\text{щ}} * l_{\text{щ}} = 1.6 * 3.2$

Відношення розрахункової ширини щітки до колекторного ділення:

$$\gamma = \frac{b_{\text{щ}}}{\beta_{\text{к}}} = 3.66$$

Марка щіток - E84S, що відповідає електрографітованим щіткам марки EG-61.

Кількість щіток:

$$n_{\text{щ}} = 3$$

Контактна площа щіток,  $\text{см}^2$ :

$$F_{\text{щ}} = 2p \cdot n_{\text{щ}} \cdot b_{\text{щ}} \cdot l_{\text{щ}} = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 1.6 \cdot 3.2 = 61.44$$

Щільність струму в контактї щіток,  $\text{А}/\text{см}^2$ :

$$j_{\text{щ}} = \frac{2I_n}{F_{\text{щ}}} = \frac{2 \cdot 275}{61.440000000000012} = 8.95$$

Активна довжина колектору,  $\text{см}$ :

$$l_{\text{к}} = n_{\text{щ}} \cdot (l_{\text{щ}} + 0.5) + 1.5 = 3 \cdot (3.2 + 0.5) + 1.5 = 12.6$$

Теплове навантаження колектору,  $\text{А}/\text{см}^2$ :

$$\alpha_{\text{К}} = \frac{I_n}{D_{\text{к}} \cdot l_{\text{к}}} = 0.68$$

Ширина комутаційної зони,  $\text{см}$ :

$$b_{\text{к}} = t_1 + \left[ b_{\text{щ}} + \beta_{\text{к}} \cdot \left( \epsilon_{\text{к}} + \frac{a}{p} \right) \right] \cdot \frac{D_a}{D_{\text{к}}} = 5$$

Розрахункова полюсна дуга,  $\text{см}$ :

$$b_0 = \tau - b_{\text{к}} - (4.5) \text{ explicit, ALL} = 28.274333882308138 - 5 - 4.5 = 18.77$$

Співвідношення ширини комутаційної зони до міжполюсного вікна:

$$\frac{b_{\text{к}}}{\tau - b_0} = 0.53$$

Коефіцієнт перекриття полюсного кроку:

$$\alpha = \frac{b_0}{\tau} = 0.66$$

### 3.6 Довжина сердечника якоря та супротив обмотки якоря

Вентиляція сердечника якоря – аксіальна

Магнітний потік на полюс:

$$F_a = \frac{60a \cdot E_n}{p \cdot n_n \cdot N} = \frac{60 \cdot 2 \cdot 570}{2 \cdot 1480 \cdot 460} = 0.05$$

Розрахункова довжина сердечника якоря, см:

$$l_t = \frac{F_a}{b_0 \cdot 10^{-4} \cdot B} = 32$$

Довжина полюса обрана рівною розрахункової, см:

$$l_p = l_t = 32$$

Довжина сталі сердечника якоря, см:

$$l_c = k_c \cdot l_t = 29.8$$

Індукція у основі зубця, Тл:

$$B_{zmax} = B \cdot k_c \cdot \frac{t_1}{b_{zmin}} = 2.3$$

Довжина лобової частини провідника якоря, см:

$$l_s = 1.4 \cdot \tau = 39.6$$

Довжина провідника ОЯ, см:

$$l_a = l_t + l_s = 71.6$$

Супротив ОЯ при робочій температурі 115 °С:

$$r_a = \frac{N \cdot l_a}{4650 \cdot (2a)^2 \cdot \rho_{аср}} = \frac{0.442}{\rho_{аср}}$$

Варіант 1, Ом:

$$r_{a1} = \frac{0.442}{13.62} = 0.0325$$

Варіант 2, Ом:

$$r_{a2} = \frac{0.442}{13.13} = 0.0337$$

Маса міді ОЯ:

$$m_{Cuа} = 8.9 \cdot 10^{-5} \cdot N \cdot l_a \cdot q_a = 2.931 \cdot q_a$$

Варіант 1, кг:

$$m_{Cuа1} = 2.931 \cdot 13.62 = 39.92$$

Варіант 2, кг:

$$m_{Cuа2} = 2.931 \cdot 13.13 = 38.48$$

Поперечне січення провідника зрівнювального з'єднання, мм<sup>2</sup>

$$q_y = \frac{q_c}{3} = 4.54$$

Провідник, мм<sup>2</sup>:

$$a_y \cdot b_y = 3.2 \cdot 1.4$$

$$q_y = 4.54$$

Маса міді зрівнювального з'єднання, кг:

$$G_{Cuу} = 8.9 \cdot 10^{-5} \cdot p \cdot n_y \cdot l_y \cdot q_y = 1.26$$

### 3.7 Розрахунок додаткових витрат в обмотці якоря

Для перевірки обраної висоти провідника визначаємо коефіцієнт Фільза. Це необхідно при одновиткових секціях в ОЯ

Приведена висота провідника ОЯ:

$$\xi_{\Pi} = \frac{b_{Cu}}{10} \cdot \sqrt{\frac{f}{50} \cdot \frac{a_{Cu}}{b_n} \cdot \frac{\lambda}{50}} = 0.095 \cdot cb \cdot \sqrt{\frac{ua}{b_n}}$$

$$v = \frac{31p}{\xi_{\Pi}^2} \cdot \frac{u + \gamma - 1}{K} = \frac{2.065}{\xi_{\Pi}^2}$$

Варіант 1:

Верх пазу:

$$\xi_{\text{ПВ1}} = 0.0957 \cdot 2.5 \sqrt{\frac{5 \cdot 1.4}{11.6}} = 0.74$$

$$v_{\text{В1}} = \frac{2.065}{0.74^2} = 3.77$$

Низ пазу:

$$\xi_{\text{ПН1}} = 0.0957 \cdot 2 \cdot 6.3 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 1.12}{10.2}} = 0.89$$

$$v_{\text{Н1}} = \frac{2.065}{0.89^2} = 2.61$$

Варіант 2:

Верх пазу:

$$\xi_{\text{ПВ2}} = 0.0957 \cdot 1.9 \cdot \sqrt{\frac{7.1}{11.6}} = 0.14$$

$$v_{\text{В2}} = \frac{2.065}{0.14^2} = 105.36$$

Низ пазу:

$$\xi_{\text{ПН2}} = 0.0957 \cdot 1.9 \cdot \sqrt{\frac{7.1}{10.2}} = 0.15$$

$$v_{\text{Н2}} = \frac{2.065}{0.15^2} = 91.78$$

Коефіцієнт збільшуючий супротив для пазової частини ОЯ при виконанні з непідрозділених по висоті паза провідників:

$$K_{\text{фП}} = 1 + \frac{0.76 \cdot \text{м}^2 \cdot \xi_{\text{П}}^2}{2 + v}$$

Варіант 1: Верх пазу:

$$K_{\text{фПВ1}} = 1 + \frac{0.76 + 2^2 + 0.74^2}{2 + 3.755} = 1.92$$

Низ пазу:

$$K_{\text{фПН1}} = 1 + \frac{0.76 + 2^2 + 0.89^2}{2 + 2.599} = 2.21$$



Варіант 2: Верх пазу:

$$K_{\text{фпв2}} = 1 + \frac{0.76 + 10^2 + 0.14^2}{2 + 102.5} = 1.96$$

Низ пазу:

$$K_{\text{фпн2}} = 1 + \frac{0.76 + 10^2 + 0.15^2}{2 + 90.2} = 2.09$$

Коефіцієнт збільшення супротиву пазової частини з підрозділенням по висоті паза провідником:

$$K'_{\text{фп}} = 1 + \frac{K_{\text{фп}} - 1}{c^2} + \frac{c^2 - 1}{c^2} \cdot (K_{\text{фп}} - 1) \cdot \frac{l_t}{l_n}$$

Варіант 1: Верх пазу:

$$K'_{\text{фпв1}} = 1 + \frac{1.29 - 1}{2^2} + \frac{2^2 - 1}{2^2} \cdot (1.29 - 1) \cdot \frac{32}{71.6} = 1.17$$

Низ пазу:

$$K'_{\text{фпн1}} = 1 + \frac{1.524 - 1}{2^2} + \frac{2^2 - 1}{2^2} \cdot (1.524 - 1) \cdot \frac{32}{71.6} = 1.31$$

Варіант 2: Верх пазу:

$$K'_{\text{фпв2}} = K_{\text{фпв2}} = 1.96$$

Низ пазу:

$$K'_{\text{фпн2}} = K_{\text{фпн2}} = 2.09$$

Коефіцієнт збільшення супротиву:

$$K_f = 1 + (K'_{\text{фп}} - 1) \cdot \frac{l_t}{l_n}$$

Варіант 1:

$$K_{\text{фв1}} = 1 + (1.164 - 1) \cdot \frac{32}{71.6} = 1.07$$

$$K_{\text{фн1}} = 1 + (1.319 - 1) \cdot \frac{32}{71.6} = 1.14$$

Середнє:

$$K_{fcp1} = \frac{(K_{fb1} + K_{fh1})}{2} = 1.11$$

Варіант 2:

$$K_{fb2} = 1 + (1.015 - 1) \cdot \frac{32}{71.6} = 1.01$$

$$K_{fh2} = 1 + (1.019 - 1) \cdot \frac{32}{71.6} = 1.01$$

Середнє:

$$K_{fcp2} = \frac{(K_{fb2} + K_{fh2})}{2} = 1.01$$

Якщо виконувати ОЯ за другим варіантом середній коефіцієнт збільшення супротиву буде менше на 10%, ніж у реальному двигуні.

### 3.8 Розрахунок комутації та додаткових полюсів

Приведена магнітна провідність пазу:

При номінальній частоті обертання:

$$\xi = 0.6 \cdot \frac{h_{\Pi.}}{b_{\Pi.}} + \frac{l_s}{l_t} + \frac{500^2}{A \cdot l_t \cdot w_c \cdot V_{an}} \cdot \frac{a}{p} = 4.16$$

При максимальній частоті обертання:

$$\xi_{\max} = 3.62$$

Реактивна ЕРС:

При номінальній частоті обертання, В:

$$e_{rn} = 2l_t \cdot w_c \cdot A \cdot \xi \cdot V_{an} \cdot 10^{-6} = 2.08$$

При максимальній частоті обертання, В:

$$e_{r\max} = 3.91$$

Отримані дані знаходяться в діапазоні, який забезпечує гарні умови комутації без КО

Питома магнітна провідність:

$$\lambda_{\Pi} = 1.25 \cdot \left( \frac{h_1}{3b_{\Pi}} + \frac{h_2}{b_{\Pi}} \right) = 1.744$$

$$\lambda_z = \frac{b_{z1}}{2\delta_{\text{дп}}} = 0.81$$

$$\lambda_s = 0.5$$

Зазор під додатковим полюсом:

$$\delta_{\text{дп}} = 8$$

Приведена ширина щітки та співвідношення приведеної ширини щітки до колекторного ділення, см:

$$b'_{\text{щ}} = b_{\text{щ}} - \delta_{\text{щ}} + \beta_{\text{к}} \cdot \left( 1 - \frac{a}{p} \right) = 1.52$$

$$\gamma' = \frac{b'_{\text{щ}}}{\beta_{\text{к}}} = 3.48$$

$$4u' = 9$$

Питома результуюча провідність пазу:

$$\xi' = \frac{4u'}{2\gamma'} \cdot (\lambda_{\Pi} + \lambda_z) + \lambda_s \cdot \frac{l_s}{l_t} = 3.93$$

Реактивна ЕРС:

При номінальній частоті обертання:

$$e_{\text{гн}} = 2l_t \cdot w_c \cdot A \cdot \xi' \cdot V_{\text{ан}} \cdot 10^{-6} = 1.97$$

При максимальній частоті обертання:

$$e_{\text{гмакс}} = 2l_t \cdot w_c \cdot A \cdot \xi' \cdot V_{\text{амакс}} \cdot 10^{-6} = 4.25$$

Число витків в котушці додаткового полюса:

$$w_{\text{дп}} = K_{\text{дп}} \cdot \frac{N \cdot a_{\text{дп}}}{8a \cdot p} = 15.81$$

Приймаємо:  $w_{\text{дп}}' = 16$

Коефіцієнт викривлення поля при перенавантаженні:

$$K_H = 1 + \frac{b_0 \cdot A \cdot (1 - K_k) \cdot K_i}{16000 \cdot B'_{\delta} \cdot \delta \cdot K_1} = 4.49$$

Максимальна напруга між сусідніми колекторними пластинами, В:

$$\epsilon_{\text{кмакс}} = \frac{2p \cdot U_n}{\alpha \cdot K} \cdot K_H = 70.47$$

На основі отриманої величини можемо сказати, що потрібно запобігати двократному перенавантаженню по струму.

Ширина башмаку додаткового полюса, см:

$$b_{\text{дп}} = b_k - 2\delta_{\text{дп}} = 3.4$$

Довжина додаткового полюса, см:

$$l_{\text{дп}} = l_t = 32$$

Індукція в зазорі додаткових полюсів, Тл:

$$B_{\text{дп}} = \xi \cdot A \cdot \frac{l_t}{l_{\text{дп}}} \cdot 10^{-4} = 0.12$$

Потік в зазорі додаткових полюсів, Вб:

$$\Phi_{\text{дп}} = b_k \cdot l_{\text{дп}} \cdot B_{\text{дп}} \cdot 10^{-4} = 1.87 \times 10^{-3}$$

Потік в сердечнику полюса, Вб:

$$\Phi_{\text{дпп}} = \sigma_{\text{дп}} \cdot \Phi_{\text{дп}} = 6.53 \times 10^{-3}$$

Коефіцієнт розсіяння додаткових полюсів в машині без КО -  $\sigma_{\text{дп}} = 3.5$

Потік в сердечнику полюса при перенавантаженні, Вб:

$$\Phi_{\text{дппп}} = K_i \cdot \Phi_{\text{дпп}} = 11.2 \cdot 10^{-3}$$

Ширина сердечника полюса, см:

$$b_{\text{дпп}} = \frac{\Phi_{\text{дппп}}}{B_m \cdot l_{\text{дп}}} = 2.69$$

В реальній машині ширина сердечника  $b_{\text{дпп}} = 3$  см, надалі розрахункову величину округлим до реальної.

Для сталі Ст3 та Э11  $B_m = 1.3$  Тл, але якщо полюс виконати з сталі марок 3312 або 3313, то значення індукції можливо збільшити до 1.7 Тл.

Коефіцієнт зазору:

$$K_{дп1} = \frac{t_1 + 10\delta_{дп}}{b_{z1.} + 10\delta_{дп}} = 1.01$$

Зазор під додатковим полюсом, см:

$$\delta_{дд} = \frac{(b_{z1.} - 1) \cdot \tau}{1.6 \cdot \xi_{\max} \cdot K_{дп1} \cdot \frac{l_{дп}}{l_t}} = 1.44$$

Між ярмом та додатковим полюсом робиться зазор з немагнітних прокладок товщиною 0.5 см. На практиці між ярмом та сердечником додаткового полюса слід зробити сталеві прокладки із листової сталі 0.5 мм. Загальна товщина – 1.5 мм.

Щільність струму в обмотках, А/мм<sup>2</sup>:

$$j_{дп} = \frac{I_n}{a_{дп} \cdot q_{дп}} = 3.44$$

Довжина витка, см:

$$l_{дв} = 87$$

Супротив обмотки додаткових полюсів при температурі 115 °С, Ом:

$$r_{115} = \frac{2\rho \cdot w_{дп} \cdot l_{дв}}{4650 \cdot a_{дп}^2 \cdot q_{дп}} = 0.01$$

Маса міді обмотки додаткових полюсів, кг:

$$m_{судп} = 2 \cdot \rho \cdot w_{дп} \cdot l_{дв} \cdot q_{дп} \cdot 8.9 \cdot 10^{-5} = 39.18$$

### 3.9 Розрахунок магнітного ланцюга та кривої намагнічування

Розрахунковий зазор під серединою та під краєм полюса, см:

$$\delta' = 0.009 \cdot D_a = 0.32$$

$$\delta'' = \frac{\delta'}{1.5} = 0.22$$

$$\delta''' = 2\delta' = 0.65$$

Зазор під полюсом в реальній машині:  $\delta_r = 0.45$

Відношення зазору до ширини пазу:

Розрахунковий зазор:

$$\frac{\delta' \cdot 10}{b_{\Pi}} = 0.11$$

Реальний зазор:

$$\frac{\delta_r \cdot 10}{b_{\Pi}} = 0.15$$

Розміри головного полюса,  $\text{см}^2$ :

$$S_m = a_m \cdot b_m = 448$$

Довжина полюса,  $\text{см}$ :

$$l_m = a_m = 32$$

Висота полюса,  $\text{см}$ :

$$h_m = 6$$

Коефіцієнт розсіювання:  $\sigma = 1.18$

Індукція в сердечнику головного полюса,  $\text{Тл}$ :

$$B_m \cdot \frac{\sigma \Phi_a}{S_m \cdot 10^{-4}} = 1.72$$

Довжина магнітної лінії в сердечнику полюса,  $\text{см}$ :

$$l_{ml} = 2 \cdot h_m = 12$$

Розміри поперечного січення ярма,  $\text{см}^2$ :

$$S_j = h_j \cdot l_j = 245$$

$$h_j = 4.5 \text{ - товщина ярма, см}$$

$$l_j = 1.7 \cdot l_t = 54.48 \text{ - ширина ярма, см}$$

Індукція у частинах станини, Тл:

$$B'_j = \frac{\sigma \cdot \Phi_a + \Phi_{\text{дп}}}{2 \cdot S_j \cdot 10^{-4}} = 1.25$$

Внутрішній діаметр станини, см:

$$D_j = D_a + 2 \cdot h_{\text{м}} = 48$$

Довжина магнітної силової лінії, см:

$$l_{\text{л}} = \frac{\pi \cdot (D_j + h_j)}{2 \cdot p} + h_j = 46$$

Індукція в ярмі станини, Тл:

$$B_j = \frac{\sigma \cdot \Phi_a}{2 \cdot S_j \cdot 10^{-4}} = 1.21$$

Поперечне січення сердечника якоря, см<sup>2</sup>:

$$S_a = \frac{l_t \cdot (D_a - 2 \cdot h_{\text{п.}} - 2 \cdot d_{\text{в0}} - d_{\text{в}})}{2} = 221.11$$

Висота спини сердечника якоря, см:

$$h_a = \frac{S_a}{l_t} = 6.9$$

Внутрішній діаметр сердечника якоря, см:

$$D_i = D_a - 0.2 \cdot h_{\text{п.}} - 2 \cdot h_a = 21.5$$

Індукція в ярмі якоря, Тл:

$$B_a = \frac{\Phi_a}{2 \cdot S_a \cdot 10^{-4}} = 1.14$$

Діаметр валу  $d_{\text{в}} = 11.2$  см, вентиляційні отвори в ярмі якоря  $n_{\text{к}} = 16$ ,  
 $d_{\text{к}} = d_{\text{в0}} = 2$  см.

Довжина магнітної лінії в сердечнику якоря, см:

$$l_{\text{а.}} = \frac{\pi \cdot (D_i + h_a)}{2 \cdot p} + h_a = 29.21$$

Коефіцієнт зазора:

$$K'_1 = \frac{t_{1.} + 10 \cdot \delta_r}{b_{z1} + 10 \cdot \delta_r} = 1.2$$

Коефіцієнт індукції у зубцях:

$$K_{s1} = \frac{t_{1.}}{b_{z1}} = 1.89$$

$$K_{s2} = \frac{t_{1.}}{b_{z2}} = 2.41$$

$$K_{s3} = \frac{t_{1.}}{b_{z3}} = 2.12$$

$$K_{s4} = \frac{t_{1.}}{b_{z4}} = 2.56$$

Довжина магнітної лінії у зубцях, см:

$$l_z = 0.2 \cdot h_{п..} = 0.7$$

Індукція у різних сідченнях зубця, Тл:

$$B_{z1} = K_{s1} \cdot B_\delta = 1.58$$

$$B_{z2} = K_{s2} \cdot B_\delta = 2.01$$

$$B_{z3} = K_{s3} \cdot B_\delta = 1.77$$

$$B_{z4} = K_{s4} \cdot B_\delta = 2.14$$

Питомі ампер-витки, А/см:

$$aw_{z1} = 100$$

$$aw_{z3} = 100$$

$$aw_{z2} = 250$$

$$aw_{z4} = 350$$

$$aw_z = \frac{aw_{z1} + 4 \cdot aw_{z2} + 4 \cdot aw_{z3} + aw_{z4}}{10} = 185$$

МРС для проходження магнітного потоку через зубцевий шар, А:

$$F_z = aw_z \cdot l_z = 129.5$$

МРС для проходження магнітного потоку через зазор, А:



$$F_{\delta} = 1.6 \cdot 10^4 \cdot B_{\delta} \cdot K'_1 \cdot \delta_r = 7214.4$$

Питомі МРС на ділянках магнітного ланцюга, А/см:

$$aw_a = 5 \quad aw_m = 12 \quad aw_j = 10$$

МРС для проходження магнітного потоку через:

Сердечник якоря, А:

$$F_a = aw_a \cdot l_a = 358.14$$

Сердечник полюса, А:

$$F_m = aw_m \cdot l_m = 384$$

Станину, А:

$$F_j = aw_j \cdot l_j = 544.76$$

Стик між полюсами та станиною, А:

$$F_{mj} = 1.6 \cdot 10^4 \cdot B_m \cdot \delta_{mj} = 312$$

$$\delta_{mj} = 0.015$$

Формула для визначення кількісного зв'язку між  $E_a/n$ (Вб) та  $\Phi_a$ (В/(об/хв)):

$$\Phi_a = \frac{60 \cdot a \cdot E_a}{p \cdot N \cdot n} = 0.13 \cdot \frac{E_a}{n}$$

$$\frac{E_a}{n} = 7.67 \Phi_a$$

Таблиця 3. 1 Розрахунок кривої намагнічування

Ділянка магнітного ланцюга		$\Phi_a = 50.2 * 10^{-3}$ $\frac{E_a}{n} = 0.384$			$\Phi_a = 45 * 10^{-3}$ $\frac{E_a}{n} = 0.342$			$\Phi_a = 37.5 * 10^{-3}$ $\frac{E_a}{n} = 0.285$			$\Phi_a = 55 * 10^{-3}$ $\frac{E_a}{n} = 0.418$		
		<b>B</b>	<b>aw</b>	<b>F</b>	<b>B</b>	<b>aw</b>	<b>F</b>	<b>B</b>	<b>aw</b>	<b>F</b>	<b>B</b>	<b>aw</b>	<b>F</b>
Зазор		0.835		7214	0.748		6462	0.6233		5385	0.91		7898
Зубцевий шар	$B_{z1}$	1.587	100	129.5	1.41	90	74.6	1.178	80	61.6	1.32	110	284.2
	$B_{z2}$	1.01	250		1.8	100		1.5	90		2.2	550	
	$B_{z3}$	1.77	100		1.58	100		1.32	85		1.93	200	
	$B_{z4}$	2.13	350		1.91	175		1.59	100		2.34	950	
Сердечник якоря		1.13	5	146	1.02	3	87.6	0.85	1	29.2	1.25	6	175.2
Сердечник полюса		1.32	12	144	1.19	7	84	0.992	0.8	9.6	1.45	16	192
Стик полюса- станини		1.32		318.8	1.19		285.7	0.992		238	1.45		349.2
Станина		1.209	10	464	1.08	5	232	0.903	3	139.2	1.32	20	928
$F_1 = \Sigma F$		8416.7			7226.6			5862.9			9827.3		
$F_{\delta z} = F_{\delta} + F_z$		7343.9			6537.3			5446.9			8182.9		

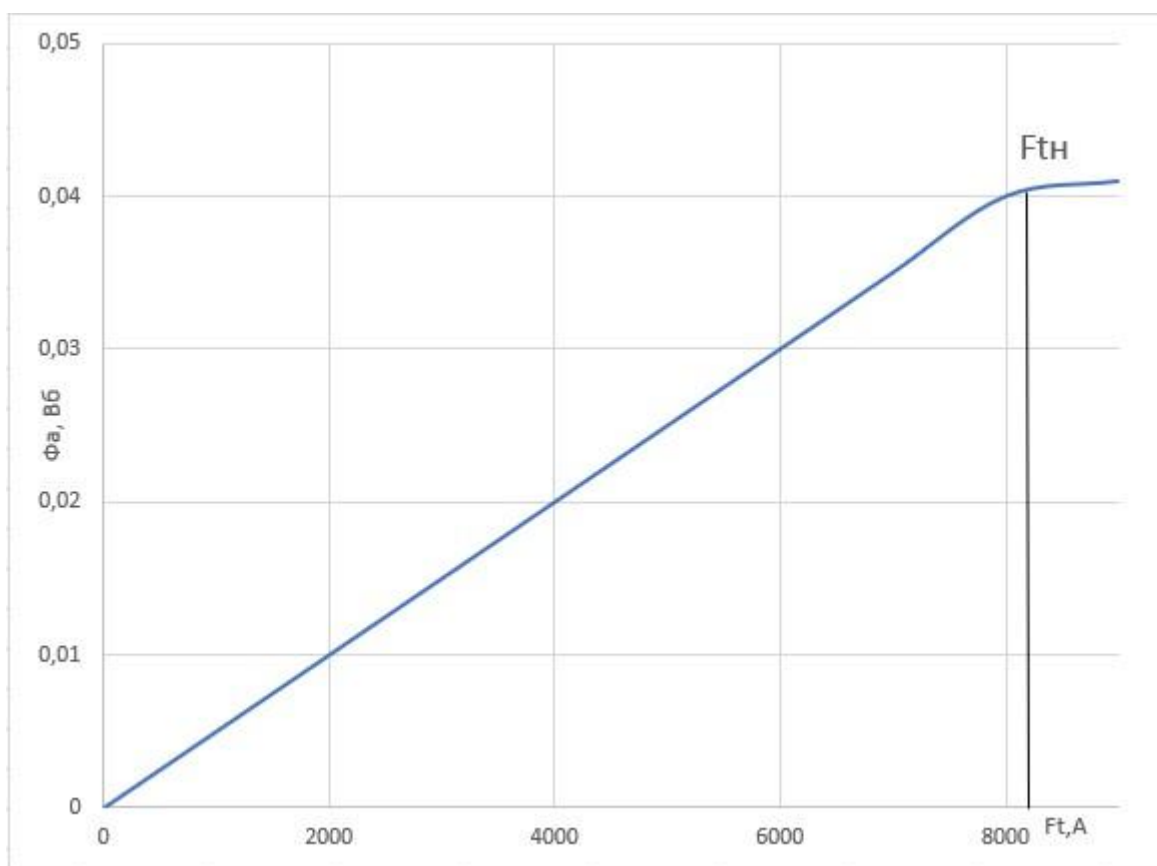


Рисунок 3. 3 Крива намагнічення двигуна  $\Phi_a = f(F_t)$

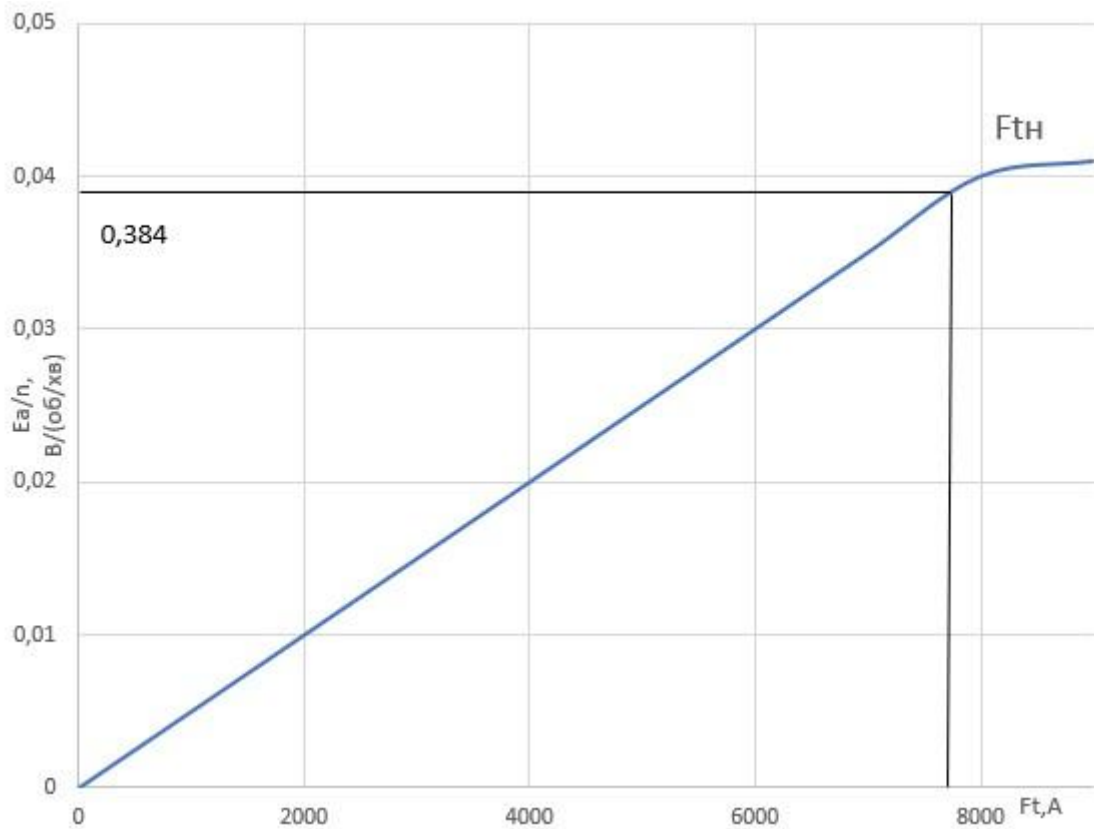


Рисунок 3. 4 Крива намагнічення двигуна  $\frac{E_a}{n} = f(F_t)$

### 3.10 Розрахунок обмотки збудження

Довжина витка обмотки послідовного збудження, см:

$$l_{\text{вср}} = 116$$

Поперечне січення обмотки, мм<sup>2</sup>:

$$q_{\text{в}} = 80$$

Кількість витків в котушці одного полюса:  $w_{\text{п}} = 25$

Кількість витків в ОЗ:  $w_{\text{в}} = 50$

Кількість паралельних гілок:  $a_{\text{в}} = 2$

Максимальна МРС, А:

$$F_{\text{вн}} = 2 \cdot w_{\text{в}} \cdot l_{\text{в}} = 13750$$

Супротив ОЗ, при температурі 115°C, Ом:

$$r_{B115} = \frac{2 \cdot p \cdot w_B \cdot l_{вср}}{4650 \cdot q_B \cdot a_B^2} = 0.02$$

ЕРС ОЯ, В:

$$E_a = U_n - I_n \cdot (r_{a115} + r_{дп115} + r_{B115}) - \Delta U_{ш} = 580.32$$

Маса міді ОЗ, кг:

$$m_{суб} = 2 \cdot p \cdot w_B \cdot l_{вср} \cdot q_B \cdot 8.9 \cdot 10^{-5} \text{ explicit, ALL} = 2 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 116 \cdot 80 \cdot 8.9 \cdot 10^{-5} = 165.18$$

### 3.11 Розрахунок втрат та ККД

Маса міді ярма якоря, кг:

$$m_{ct} = \frac{\pi}{4} \cdot \left[ (D_a - 2h_{п.})^2 - d_B^2 - n_{B0} \cdot d_{B0}^2 \right] \cdot l_t \cdot 7.8 \cdot 10^{-3} = 192.89$$

Маса сталі зубців якоря, кг:

$$m_{ctz} = Z \cdot l_t \cdot b_{z\phi} \cdot h_{п.} \cdot 7.8 \cdot 10^{-3} = 44.27$$

Втрати у сталі ярма якоря для сталі марки Е-31, товщиною  $\Delta=0.5$  мм, при

$$\text{частоті обертання } n_n = 1480 \text{ об/хв та } B_a = 1.13 \text{ Тл, } f = \frac{p \cdot n_n}{60} = 49.33 \text{ Гц, Вт:}$$

$$\Delta P_{ct} = \frac{f \cdot (f + 200)}{1700} \cdot B_a^2 \cdot m_{ct} = 1798.49$$

Втрати в сталі зубців якоря для сталі марки Е-31, Вт:

$$B_{z\phi} = 1.89$$

$$\Delta P_{ctz} = \frac{f \cdot (f + 100)}{1300} \cdot B_{z\phi}^2 \cdot m_{ctz} = 896.08$$

Втрати у ОЗ, Вт:

$$\Delta P_{суб} = I_n^2 \cdot r_B = 2344$$

Втрати в обмотці додатних полюсів, Вт:

$$\Delta P_{судр} = I_n^2 \cdot r_{дп} = 1134$$

Втрати в обмотці якоря, Вт:

У пазовій частині:

$$\Delta P_{\text{суп}} = I_n^2 \cdot r \cdot K_{\text{фспр}} \cdot \frac{l_t}{l_{\text{ср}}}$$

$$\Delta P_{\text{суп1}} = 275^2 \cdot 0.0325 \cdot \frac{1.29 + 1.524}{2} \cdot \frac{32}{71.5} = 1548$$

$$\Delta P_{\text{суп2}} = 275^2 \cdot 0.0337 \cdot \frac{1.015 + 1.019}{2} \cdot \frac{32}{71.5} = 1160$$

У лобовій частині:

$$\Delta P_{\text{суд}} = I_n^2 \cdot r \cdot \frac{l_s}{l_{\text{ср}}}$$

$$\Delta P_{\text{суд1}} = 275^2 \cdot 0.0325 \cdot \frac{39.5}{71.5} = 1358$$

$$\Delta P_{\text{суд2}} = 275^2 \cdot 0.0337 \cdot \frac{39.5}{71.5} = 1408$$

Втрати в колекторі, Вт:

Електричні втрати у контактах щіток:

$$\Delta P_{\text{елщ}} = \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_n = 550$$

На тертя щіток при номінальній частоті обертання:

$$\Delta P_{\text{трщ}} = 0.35 \cdot F_{\text{щ}} \cdot \frac{D_k \cdot n_n}{60} = 533$$

Механічні втрати, Вт:

$$\Delta P_{\text{мх}} = K_m \cdot \left( \frac{\nu_n}{10} \right)^{1.6} \cdot P_n = 697.11$$

Сума механічних втрат та втрат на примусову вентиляцію, Вт:

$$\Delta P_{\text{мх}} + \Delta P_{\text{в}} = 3000$$

Сума усіх втрат при номінальному навантаженні та швидкості обертання,  
Вт:

$$\Sigma\Delta p_1 = 2004 + 886 + 2344 + 1134 + 1548 + 1358 + 550 + 553 + 3000 = 13377$$

$$\Sigma\Delta p_2 = 2004 + 886 + 2344 + 1134 + 1160 + 1408 + 550 + 553 + 3000 = 13039$$

ККД:

$$\eta_1 = 1 - \frac{13377}{150000} = 0.911$$

$$\eta_{1\%} = 91.1$$

$$\eta_2 = 1 - \frac{13039}{150000} = 0.913$$

$$\eta_{2\%} = 91.3$$

### 3.12 Тепловий розрахунок

Умовне питоме теплове навантаження сердечника якоря від втрат на перемагнічування:

$$w_1 = \frac{\Delta p_{ста} + \Delta p_{стз}}{\pi D_a l_t k_B} = \frac{2004 + 886}{\pi * 36 * 32 * 1.89} = 0.423 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$$

Де  $k_B = 1.89$  – коефіцієнт, враховуючий наявність в сердечнику якоря вентиляційних каналів.

Умовне питоме теплове навантаження сердечника якоря від втрат в пазовій частині ОЯ:

$$w_2 = \frac{k_{fn} j_a A}{4000 K_B}$$

$$\text{Для першого варіанту: } w_2 = 0.265 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$$

$$\text{Для другого варіанту: } w_2 = 0.197 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$$

Умовне питоме теплове навантаження сердечника лобової частини якоря від втрат в неї:

$$w_2 = \frac{j_a A}{4000} * \frac{l_S}{l_{\text{ВЫЛ}}}$$

Для першого варіанту:  $w_2 = 0.495 \text{ Вт/см}^2$

Для другого варіанту:  $w_2 = 0.513 \text{ Вт/см}^2$

Питоме теплове навантаження на пазову ізоляцію:

$$w_3 = w_2 K_B * \frac{t_1}{\Pi}$$

Для першого варіанту:  $w_3 = 0.134 \text{ Вт/см}^2$

Для другого варіанту:  $w_3 = 0.1 \text{ Вт/см}^2$

де  $\Pi=9.2$  - периметр пазу.

Кількість повітря необхідного для охолодження машини:

$$V = \frac{\Sigma \Delta p}{1.1 \theta_B} = 0.607 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Швидкість повітря по осі машини:

$$V_l = \frac{V}{S} = 28 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

де  $S=217 \text{ см}^2$

Результуюча швидкість повітря:

$$V_B = \sqrt{\left(\frac{V_l}{2}\right)^2 + V_l^2} = 31.3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Перевищення температури сердечника якоря:

$$\theta_{act} = \frac{(W_1 + W_2) * C_{act}}{1 + \beta V_B}$$

де  $C_{act} = 450$

Для першого варіанту:  $\theta_{act} = 42.7 \text{ К}$

Для другого варіанту:  $\theta_{act} = 38.4 \text{ К}$



Перепад температур по товщині пазової ізоляції:

$$\theta_{\text{из}} = W_3 * \frac{\delta_{\text{изп}}}{\lambda_{\text{из}}}$$

Де  $\delta_{\text{изп}} = \frac{b_{\text{п}} - (\gamma - 1)a_{\text{из}} - a}{2}$  – відстань від стінки пазу до міді, мм.

Для першого варіанту:

верх паза:  $\delta_{\text{изп}} = 1.28$  мм

$$\theta_{\text{из}} = 10.72 \text{ К}$$

низ паза:  $\delta_{\text{изп}} = 1.22$  мм

$$\theta_{\text{из}} = 10.22 \text{ К}$$

середнє:  $\theta_{\text{из}} = 10.47 \text{ К}$

Для другого варіанту:  $\delta_{\text{изп}} = 1.55$  мм

$$\theta_{\text{из}} = 9.69 \text{ К}$$

Перевищення температури лобових частин обмотки

$$\theta_{\text{ла}} = \frac{W_{\text{ла}} C_{\text{ла}}}{1 + 0.1 \left( \frac{V_a}{2} + V_B \right)} = \frac{350}{1 + 0.1 \left( \frac{28}{2} + 31.3 \right)} * W_{\text{ла}} = 63.3 * W_{\text{ла}}$$

Де  $C_{\text{ла}} = 350$

Для першого варіанту:  $\theta_{\text{ла}} = 31.5 \text{ К}$

Для другого варіанту:  $\theta_{\text{ла}} = 32.6 \text{ К}$

Середнє перевищення температури ОЯ:

Для першого варіанту:  $\theta_{\text{аср}} = 41.2 \text{ К}$

Для другого варіанту:  $\theta_{\text{аср}} = 39.53 \text{ К}$

Максимальні розрахункові температури при температурі зовнішнього повітря  $\theta_{\text{зов.}} = 35 \text{ С}$

Пазова частина ОЯ:

Для першого варіанту:  $\theta_{\text{па}} = 42.7 + 10.47 + 20 + 35 = 108.27 \text{ С}$

Для другого варіанту:  $\theta_{\text{па}} = 38.4 + 9.69 + 20 + 35 = 103.09 \text{ С}$

Лобова частина ОЯ:

Для першого варіанту:  $\theta_{па} = 31.5 + 20 + 35 = 86.5$  С

Для другого варіанту:  $\theta_{па} = 32.6 + 20 + 35 = 87.6$  С

Залізо якоря:

Для першого варіанту:  $\theta_{за} = 42.7 + 20 + 35 = 97.7$  С

Для другого варіанту:  $\theta_{за} = 38.4 + 20 + 35 = 93.4$  С

Колектору:

$$\theta_K = 38.2 + 35 = 73.2 \text{ С}$$

### 3.13 Розрахунок струму КЗ

Індуктивність ОЗ, Гн:

$$L_3 = 2 \cdot p \cdot \frac{w_B}{a_B} \cdot \frac{\sigma \cdot \Phi_H}{I_n} = 0.02$$

Постійна часу ланцюга збудження, с:

$$T_c = \frac{L_3}{r_B} = 0.69$$

Індуктивність якірного ланцюга двигуна, Гн:

$$L_a = \frac{5 \cdot U_n}{2 \cdot p \cdot n_n \cdot I_n} = 0.00184$$

Умовне падіння напруги у якірному ланцюга при номінальному струмі:

$$\Delta U_k = R_{a\Sigma} \cdot I_n + \Delta U_{щ} \cdot K_0 \cdot \gamma \cdot e_r$$

$$R_{a\Sigma} = r_a + r_{дп} + r_B$$

$$K_0 = 1$$

Варіант 1:

$$R_{a\Sigma 1} = 0.0325 + 0.015 + 0.031 = 0.0785$$

$$\Delta U_{k1} = 0.0785 \cdot 275 + 2 + 1 \cdot 3.66 \cdot 1.96 = 30.76$$

Варіант 2:

$$R_{a\Sigma 2} = 0.0337 + 0.015 + 0.031 = 0.0797$$

$$\Delta U_{k2} = 0.0797 \cdot 275 + 2 + 1 \cdot 3.66 \cdot 1.96 = 31.09$$

Відносний супротив якірного ланцюга, у.о.:

$$r_{я} = \frac{\Delta U_k}{U_n}$$

$$r_{я1} = \frac{30.76}{600} = 0.0513$$

$$r_{я2} = \frac{31.09}{600} = 0.0518$$

Коефіцієнт реакції якоря:

$$\beta = \frac{F_{ря} + b_k \cdot A}{F_{k0}} = 0.299$$

$F_{ря} = 1120$  - розмагнічуюча МРС реакції якоря

Перехідний супротив якірного ланцюга:

$$r'_{d0} = 0.051 + 0.015 \cdot 0.299 = 0.055$$

Устаткований супротив якірного ланцюга:

$$r_d = 0.051 + 0.299 = 0.35$$

Перехідна постійна часу ланцюга збудження, с:

$$T'_c = T_c \cdot \frac{r'_{d0}}{r_d} = 0.11$$

Перехідна постійна часу якірного ланцюга, с:

$$T_{я} = \frac{L_a + L_c}{R_{a\Sigma}} = 0.297$$

Перехідна постійна часу якірного ланцюга у надпровідності ланцюга збудження, с:

$$T'_{я0} = T_{я} \cdot \frac{r_{я}}{r'_{d0}} = 0.27$$

Перехідний супротив якірного ланцюга:

$$r'_d = r'_{d0} - \frac{2T'_{я0}}{T'_B} \cdot r'_{d0} = 0.067$$

Максимальне значення струму КЗ у долях номінального:

$$i_{k\max} = 14.8$$

Устаткований струм КЗ в долях номінального

$$i_{ky} = \frac{e_{ky}}{r'_d} = 2.86$$

Час від початку КЗ до досягнення струмом максимального значення, с:

$$t_m = T'_{я0} \cdot \ln \left( \frac{T'_c}{T'_{я0}} \cdot \frac{i_{k\max}}{i_{k\max} - i_{ky}} \right) = 0.06$$

Максимальний момент обертання при КЗ:

$$M_{\max} = (i_{k\max})^2 \cdot r'_{я} = 11.17$$

### 3.14 Порівняння виконання двох варіантів обмоток двигуна

У таблицю занесено основні розрахункові величини, які дозволяють порівняти експлуатаційні показники двох варіантів виконання обмотки тягового двигуна ТН-81, з укладкою обмотувального дроту на ребро у верхній та нижній частині пазу (Варіант 1) та укладкою плазом (Варіант 2).

Таблиця 3. 2 Порівняння двох варіантів

№	Розрахункова величина		Варіант 1	Варіант 2
1	Розміри обмотувального дроту ОЯ, мм*мм	Верх паза	$2 * \frac{1.4 * 5}{1.91 * 5.51}$	$1 * \frac{1.9 * 7.1}{2.34 * 7.37}$
		Низ паза	$2 * \frac{1.13 * 6.3}{1.66 * 6.84}$	
2	Січення провідників ОЯ, мм <sup>2</sup>		13.62	13.13
3	Щільність струму в ОЯ, А/мм <sup>2</sup>		5.05	13.13

4	Опір ОЯ при робочій температурі $t=115\text{C}$ , Ом		0.0325	0.0337
5	Маса міді ОЯ, кг		38.06	37.9
6	Коефіцієнт збільшення опору для пазової частини ОЯ	Верх паза	1.29	1.015
		Низ паза	1.524	1.019
7	Втрати в ОЯ, Вт	Пазова частина	1548	1160
		Лобова частина	1358	1408
		сумарні	2906	2569
8	ККД, %		91.1	91.32
9	Перевищення температури сердечника якоря, К		42.7	38.4
10	Перепад температури по товщині пазової ізоляції, К		10.47	9.69
11	Перевищення температури лобових частин обмотки, К		31.5	32.6
12	Середнє перевищення температури ОЯ, К		41.2	39.5
13	Максимальні розрахункові температури при температурі навколишнього повітря $35\text{C}$	Пазова частина ОЯ	108.27	103.09
		Лобова частина ОЯ	86.5	87.6
		Сердечник якоря	97.7	93.4

На основі зроблених розрахунків можна провести аналіз, який дає такі висновки:

1. У другому варіанті краще використання міді машини, це досягається завдяки зменшенню втрат від витіснення струму в провідниках пазу. Через меншу масу та більш високу щільність струму сумарні втрати в ОЯ – менші, аніж у першому варіанту;
2. другий варіант має менші показники перевищення та перепади температур в сердечнику та пазовій частині ОЯ;
3. виконання ОЯ у другому варіанті потребує одного типоміналу обмотувального дроту, а у першому варіанту – два типоміналу. Завдяки цьому зменшується сортамент матеріалів, що є позитивним економічним фактором який знижає собівартість та ремонт двигуна. Враховуючи поширеність тролейбусів ДАК-217Е та відносно низьку експлуатаційну надійність тягових двигунів ТН-81, особливо в містах з складним рельєфом, слід звернути увагу організацій, ремонтних та експлуатаційних, на можливість збільшення надійності машин після ремонту.

### 3.15 Висновки до розділу 3

Проведений електромагнітний і тепловий розрахунок, а також розрахунок характеристик намагнічування і перехідних характеристик зміни частоти обертання і струму в двигуні при розгоні порожнього і повністю завантаженого тролейбуса показали, що сталь базового двигуна використана в оптимальному режимі.

Розрахункові значення реактивної ЕРС знаходяться в діапазоні, який забезпечує задані режими комутації при номінальному навантаженні.

Теплові режими обмоток, заліза і колектору відповідні для класу F нагрівостійкості і використовуваної ізоляції.

Запропонований варіант виконання обмотки дешевше базового за рахунок використання обмотувального проводу одного сортаменту і кращої технологічності.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

Стартап як форма малого підприємства за останні десять років набула широкого розповсюдження у світі, це було досягнене завдяки появі та швидкому розвитку інтернету. Завдяки чому бар'єр на вхід до ринку було значно зменшено, тобто комунікації між постачальниками, інвесторами та споживачами були зведені до мобільного телефону, саме через це стартапи вважаються однією з головних складових сучасної економіки, оскільки за рахунок мобільності, простоті входу та великій кількості проектів загальна маса ідей збільшується. Що позитивно впливає на інноваційний підхід великих компаній та впровадження нових ідей на основі опиту малих стартап-проектів.

Проте слід відзначити, що стартап-проекти мають негативну особливість, а саме великі ризики. Серед усіх успішних проектів лише 5% - 10% можуть стати окупленими та продовжити розвиток своєї компанії. Сам стартап-проект є лише ідеєю, яка не має великої цінності, головне завдання керівника створення бізнес-проекту, який буде давати уяву клієнтського ринку, початкових інвестиції та перспектив усього стартапу.

До головних етапів розробки стартап-проекту відносять:

- Маркетинговий аналіз, у цьому етапі розробляється ідея стартапу та визначається загальний напрям потенційного товару або послуги, їх відмінність в порівнянні з конкурентом. Аналізуються ринок та можливості реалізації товару на ринку, на базі чого робиться початкова стратегія впровадження товару на ринок;
- Організація стартап-проекту, в межах даного етапу складається графік, який визначає терміни реалізації ступенів проекту. Проводиться розрахунок потреб основних засобів та нематеріальних активів. Визначається обсяг виробництва, на основі якого формується потреба у матеріальних та персональних ресурсах;
- До фінансово-економічного етапу відносять розрахунки початкового бюджет та планові витрати. Розраховуються фінансові показники

проекту (обсяг виробництва, собівартість виробництва, ціна реалізації товару, податки та чистий прибуток) та показники привабливості проекту для інвесторів. Одним із важливих етапів у цій стадії є визначення потенційного ризику проекту, під час якого визначаються основні ризики, фактори їх виникнення та шляхи протидії;

- Останнім етапом є пошук потенційних інвесторів та початок роботи з просування інвестиційних пропозицій. Цей етап починається з аналізу та визначення цільової групи інвесторів, складання презентації для стислого ознайомлення з потенційним стартап-проектом. Пошук комунікаційних каналів та площадок для просування стартапу.

#### 4.1 Опис ідеї стартап-проекту

Ідеєю стартапу було обрано: створення тягового електродвигуна постійного струму, для застосування його у тролейбусах, масогабаритні та економічні показники якого були покращені. Використання сучасних транзисторів, інверторів та надлегких матеріалів у поєднанні з високотехнологічними методами обробки будуть сприяти створенню високоефективного двигуна.

Напрямами стартапу є: міський транспорт.

До потенційних вигоди, у разі реалізації проекту, слід віднести: економічні переваги, економія на матеріалах, модернізування та створення нових підприємств.

Таблиця 4. 1 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Потенційні концепції конкурентів				W Слаб-ка сторона	N Нейтральна сторона	S Сильна сторона
		Проект	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
1	Ефективність перетворення енергії	0,91	0,9	0,9	0,89			+
2	Можливість використання в інших галузях	Так	Так	Так	Так		+	



3	Можливість легко масштабувати як для компактних моделей електродвигунів так і для гігантських промислових ТЕД	Так	Так	Ні	Ні		+	
---	---	-----	-----	----	----	--	---	--

## 4.2 Технологічний аудит проекту

Таблиця 4. 2 Технологічна реалізація проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1		Аналіз Розрахунок Впровадження	Транзисторні інвертори, напівпровідникові випрямлячі	Легкодоступна

## 4.3 Аналіз ринку та можливість старту проекту

Таблиця 4. 3 Характеристика ринку

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість конкурентів, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	-
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стабільний
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Стартовий капітал
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ДСТУ
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	31%

Таблиця 4. 4 Характеристика потенційних клієнтів стартапу

№	Потреба що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Технологічно застарілі модифікації ТЕД, які потребують сучасних економічних для модернізації	Комунальні підприємства з перевезення пасажирів, які мають державне фінансування	Залежність від міського фінансування	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Енергоефективність</li> <li>- Економічність</li> <li>- Надійність</li> <li>- Гарантійне та післягарантійне обслуговування</li> </ul>

Таблиця 4. 5 Фактори загрози

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Конкуренція	<p>1) Сучасні підприємства, які мають більше фінансування.</p> <p>2) Виникнення більш кращого продукту, за рахунок розвитку технології.</p>	<p>1) Патентування;</p> <p>2) збільшення інвесторних груп (які будуть дозволяти створювати конкуренцію за рахунок наймання більш кращих спеціалістів);</p> <p>3) створення дослідницького відділу, який буде спрямований на поліпшення продукту.</p>

Таблиця 4. 6 Аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможними)
1. Тип конкуренції: монополістична	Обирають товар за співвідношенням ціна-якість	Зменшення націнки на товар при початковому етапі, що може збільшити попит.
2. За рівнем конкурентної боротьби: державна	Вузька сфера попиту	Розширення функціональних можливостей

3. За галузевою ознакою: міжгалузєва	Можливе застосування у галузях з використанням ТЕД.	Можливість застосування високоефективних ТЕД у вантажному великогабаритному автотранспорті
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Виділяється високою економічністю та ефективністю та низькими затратами на виробництво	Структурна оптимізація та оптимізація персоналу.
5. За характером конкурентних переваг:	Визначається співвідношенням ціни – якості та собівартості продукції	Зниження енергозатратності, оптимізація собівартості, приваблива цінова політика.
6. За інтенсивністю: не марочна	Помірна конкуренція	Видача тестових зразків, для поширення попиту та впізнаваності товару. Створення бартерної основи з конструкторськими підприємствами, для використання двигуна у їх розробках для подальшої участі у виставках.

Таблиця 4. 7 Порівняння сильних та слабких сторін

Фактор конкурентоспроможності	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з розробленим						
	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Ціна				+			
Якість						+	
Впізнаваність	+						

Таблиця 4. 8 SWOT-аналіз

<p><b>Сильні сторони:</b> Плавний запуск та регулювання потужності двигуна в широких діапазонах. Нижча вага та компактні розміри у порівнянні з конкурентами. Застосування сучасних напівпровідникових перемикачів та випрямлячів змінного струму</p>	<p><b>Слабкі сторони:</b> Мала впізнаваність бренду Низький рівень інвестицій</p>
<p><b>Можливості:</b> Великі можливості ТЕД для використання в інших суміжних галузях.</p>	<p><b>Загрози:</b> Збільшення конкуренції у даній сфері</p>

Удосконалення ТЕД з використанням сучасних технологій	
---	--

#### 4.4 Розробка маркетингової програми стартапу

Таблиця 4. 9 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є першопрохідником на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Ні	На початковому етапі слід сформувати список можливих кандидатів з числа студентів та працівників інших підприємств. У подальшому створити скаутську систему, яка дозволить забирати найкращих працівників	Тільки у разі їх переваги над товаром компанії, та після укладення відповідних договорів	Агресивна конкуренція, яка буде направлена на стабілізування компанії на ринку за рахунок рекламних компаній, та у подальшому перетворювання компанії у гегемону

Таблиця 4. 10 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
Модернізація тролейбусного парку	Висока енергоефективність та низька вартість обслуговування.	Висока стабільність роботи, низькі витрати на обслуговування та ремонт, бартерна основа, онлайн підтримка.

Таблиця 4. 11 Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на то-
--------------------------------	------------------------------	--	---

			вар/послугу
Ціни власного продукту становить 95% від середньої ринкової вартості	120%	Від 5 млн грн	100000 - 175000 грн

Таблиця 4. 12 Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Державні закупівлі за оптовими цінами	Продаж та обслуговування	Усі можливі канали	Власна

#### 4.5 Висновки до розділу 4

Проведені дослідження щодо реалізації та можливостей маркетингу показали високі перспективи розроблених моделей ТЕД на комерційній основі. Аналіз ринку доказує необхідність удосконалення. Через це даний стартап проект є привабливим для вітчизняних та іноземних інвесторів.

Даний стартап-проект є перспективним та комерційно успішним ураховуючи факт тенденції на перехід до відновлювальних джерел енергії та відмову від викопного палива, що позитивно впливає на актуальність стартапу. Але є перешкоди на шляху реалізації і до них слід віднести значну конкуренцію на ринку електроприладів, також відомість торгової марки не є сильною стороною компанії. Слід зазначити що для кожного стартап-проекту перші декілька років є надважкими, через конкуренцію яка хоч і є монополістичною, але у багатьох галузях є великі компанії-монополії, які намагаються винищити/придбати молоді компанії-конкуренти. Саме через це на початковому етапі важливо мати інвесторів або інвестиційні компанія, які зможуть фінансувати стартап до моменту формування обороту компанії.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На основі зробленої магістерської дисертації можливо зробити наступні висновки:

1. Проведений електромагнітний і тепловий розрахунок, а також розрахунок характеристик намагнічування і перехідних характеристик зміни частоти обертання і струму в двигуні при розгоні порожнього і повністю завантаженого тролейбуса показали, що сталь базового двигуна використана в оптимальному режимі. З урахуванням можливих коливань напруги в мережі до 720 В подальше збільшення електромагнітних навантажень було б недоцільним - це призвело б до значного погіршення комутації і збільшення теплових навантажень. Так, прийняте спочатку попереднє значення індукції в повітряному зазорі 0.835 Тл в подальших розрахунках було підтверджено. Для машин даного класу вказане значення індукції і лінійне навантаження 280 А/см вважаються оптимальними, а з урахуванням можливого підвищення напруги мережі їх збільшення було б нераціональним.
2. Розрахункові значення реактивної ЕРС знаходяться в діапазоні, який забезпечує задані режими комутації при номінальному навантаженні. Однак максимальна напруга між колекторними пластинами за рахунок спотворення поля при перевантаженні досягає 70.5 В, що неминуче призводить до виникнення кругового вогню на колекторі і виходу його руйнування. Тому для даного двигуна неприпустиме дворазове перенавантаження по струму при ослабленні поля. Номінальний режим роботи двигуна вважається при ослабленні поля, рівному 78%. При цьому пуск двигуна при струмі якоря, що перевищує 540 А з ослабленням поля по умовам комутації неприпустимий.
3. Розрахункова робоча точка на магнітній характеристиці дозволяє експлуатувати двигун в заданому діапазоні зміни напруги.
4. Теплові режими обмоток, заліза і колектору відповідні для класу F нагрівостійкості і використовуваної ізоляції.

Запропонований варіант виконання обмотки дешевше базового за рахунок використання обмотувального проводу одного сортаменту і кращої технологічності:

- відсутність пайки в лобових частинах, протилежних колектору;
- економить трудові витрати;
- економія витратних матеріалів (припій, флюс);
- знімає необхідність в установці спеціального дорого технологічного обладнання. Підключення зрівняльних з'єднань здійснюється за звичайною технологією-клепкою.

За рахунок укладання провідників в паз плазом досягається:

- зменшення додаткових втрат, що дозволяє поліпшити використання міді обмотки якоря з одночасним збільшенням ККД;
- зменшення теплових навантажень на ізоляцію, що істотно підвищує ресурс її служби.
- використання пазових демпферів сприятливо позначається на режимі комутації машини.

Остаточно встановити переваги запропонованого варіанту виконання обмотки можна, природно, тільки в результаті випробування, що і рекомендується зробити.

Хоч стартап-проект потребує великої кількості більш ретельних досліджень, які зможуть дати більш уявну картину потенціалу проекту, усе таки було проведено аналіз можливостей запропонованого продукту. На основі якого можливо зробити такі висновки:

- на ринку вже є конкуренти, через це значно ускладнюється вихід на цей ринок та збільшується сума потенційних інвестицій;
- правильний та детальний план рекламної компанії може дозволити пришвидшити зростання впізнаваності проекту, та збільшити початкові продажі;
- через наяву конкурентів, виникає обмеження у персоналі. Яке можливо обійти лише найманням робітників у конкурентів, за рахунок збільшення зарплат, тобто збільшення початкових інвестицій.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Безрученко В.М., Чумак В.В. Тягові електричні машини електрорухомого складу. Посібник. 2003 – 252с.
2. Флора В.Д. Тяговые электрические двигатели. - Под редакцией доцента к.т.н. Ю.С. Коробкова. Запорожье, 2011 - 318 с.
3. Розенфельд В.Е. Теория электрической тяги. Посібник. Москва, 1995 – 297.
4. URL: <https://tehnar.net.ua/osnovnyie-chasti-elektricheskikh-mashin-i-ih-naznachenie/>
5. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BA%D1%81>
6. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/DAC\\_E217](https://uk.wikipedia.org/wiki/DAC_E217)
7. URL: [https://gortransport.kharkov.ua/ps\\_models/61/](https://gortransport.kharkov.ua/ps_models/61/)
8. URL: <https://pkf-elektroplast.com.ua/ua/p38382490-tekstolit.html>
9. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0476732-17#Text>
10. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>
11. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0046588-99#Text>
12. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%8F%D0%B3%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9\\_%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D1%83%D0%BD](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%8F%D0%B3%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D1%83%D0%BD)
13. URL: <https://ohoronapraci.kiev.ua/>
14. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D1%85%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B0\\_%D0%BF%D1%80%D0%B0%D1%86%D1%96](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D1%85%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B0_%D0%BF%D1%80%D0%B0%D1%86%D1%96)



## ДОДАТОК

## COMPARISON OF TWO OPTIONS FOR CONDUCTING THE WINDINGS OF THE TRACTION DC MOTOR OF SEQUENTIAL EXCITATION

**Anna Shymanska, Ph.D., Mykola Reutskiy, Ph.D., Andriy Rybalko, student**  
*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Department of Electromechanics*

**Introduction.** The ever-increasing intensity of traffic on urban highways is accompanied by a high deceleration during braking and acceleration when starting moving vehicles. Under these conditions, the requirement for the technical condition of rolling stock increases. In the field of operation, the solution of problems should go by improving the system of maintenance and repair. Low-noise railless electric transport does not pollute the atmosphere, does not lose speed on steep climbs, works stably in winter, realizes more acceleration at start-up, has smooth electric braking. The specific energy consumption by trolleybus per one transported passenger is the lowest compared to other types of land urban transport. From the point of view of electrical safety, the trolleybus is a unique object of technology, because, despite the high voltage (600 V), the body of the trolleybus is not grounded and insulated from the ground with rubber tires. In the conditions of constant rocking of the body of the car by passengers at landing and disembarkation, hit of high potential on the body of the trolleybus represents the increased danger. Therefore, ensuring high-quality repairs, which eliminates the possibility of electric shock to passengers and staff, is an extremely important issue [1].

Isolation of traction motors works in extremely difficult conditions. The engines are located under the floor of the trolleybus at a distance of about 200 mm from the roadway. Pollution, water with chemically active substances, salt, sand in the autumn-winter period and dust in the summer are captured by the engine fans and settle together with the products of the collector-brush unit on the windings, insulators, wires. Intensive internal humidification of insulation continues in non-working engines. During the cooling period of the engine, the pressure in the pores and capillaries of the insulation is below atmospheric. Moisture penetrates into the smallest pores and capillaries, which activates and accelerates the aging and destruction of insulation. The ventilation ducts become dirty, as a result of which the thermal mode of operation of the windings is dis-

turbed. These negative moments act in conjunction with continuous fluctuations of currents and voltages. The most severe consequences are caused by a breakdown of insulation between two sections of the armature, lying in one groove in two layers. In this case, half of the entire armature winding is short-circuited, so there is a significant current in all sections of the short-circuited winding. As a result, there is a circular fire on the manifold, as well as a significant braking torque, which sharply reduces the torque on the motor shaft [2].

The TH-81 DC drive motor is designed to drive the ДАК-217Е trolleybus and is designed for operation at an altitude of not more than 1200 m, air temperature from  $-40^{\circ}\text{C}$  up to  $+40^{\circ}\text{C}$  and relative humidity not more than 95% at  $20^{\circ}\text{C}$ . Nominal operating mode – S1. Insulation heat resistance class – F. Degree of protection IP20 with self-ventilation when supplying air from the collector side. The estimated nominal operating mode is 60 minutes.

**The aim of the work** is to calculate and compare two variants of DC traction motor windings with sequential excitation TH-81, namely with the laying of the armature winding wire on the edge in the upper and lower part of the groove (option I) and with the laying of the flat armature winding wire (option II).

**Materials of research.** DC motor TH-81 sequential excitation with self-ventilation. Air purge is carried out through two holes in the housing with protective grilles. The air inside the machine moves from the collector side through the openings between the shaft and the collector and over the collector along the armature. The engine is attached to the trolleybus frame by means of three brackets, two of which are located on the shield on the gimbal side and one on the opposite side. The cross section of the output cables is  $50\text{ mm}^2$ . Shaft material steel 40SG10. All motor windings are impregnated twice in vacuum in organosilicon varnish brand KO-916K. The axial distance of the rotor after assembly is 0,4 mm. Radial beating of a collector of 0,01 mm.

The calculation of the armature winding is carried out according to the method described in [3]. According to the recommendations, the linear load

$$A = 280 A,$$

the number of parallel branches of a simple loop winding of the armature

$$2a = 2p = 4,$$

current in a parallel branch

$$i_a = \frac{I_a}{2a} = \frac{275}{4} = 68,75A$$

Previous number of armature winding conductors

$$N = \frac{\pi D_a A}{i_a} = \frac{\pi \cdot 36 \cdot 280}{68,75} = 460,6 \approx 460$$

Choose the number of conductors in the groove

$$Z/2p \geq 13,5, u = 5, w_c = 1;$$

$$S_n = 2uw_c = 10.$$

Laying of conductors in a groove can be executed in two ways: according to the scheme of the serial engine (Fig. 1, a) or according to the offered more technological scheme which does not demand soldering of front parts with groove dampers (Fig. 1, b).

The amount of current in the groove does not exceed the maximum allowable value of 2000 A

$$s_n \times i_a = 10 \times 68,75 = 687,5 A.$$

The number of grooves was specified

$$Z = \frac{N}{s_n} = \frac{460}{10} = 46$$

In the Table 1 summarizes the main calculated values that allow to evaluate and compare the performance of the two variants of the traction motor windings TH-81– with the laying of the armature winding wire on the edge in the upper and lower part of the groove and with its laying flat.

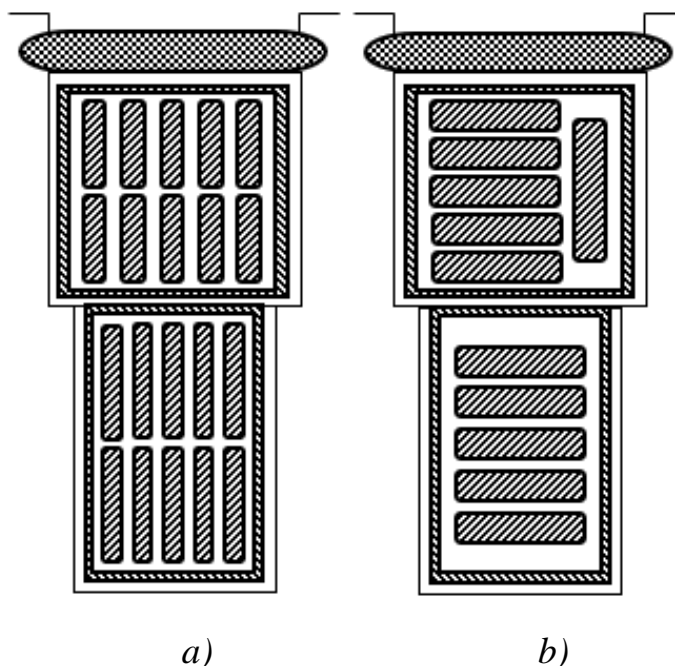


Fig. 1 – Placement of conductors in the groove: a) on the edge (option I),  
b) flat (option II)

Table 1 Comparison of winding options

№	Estimated value		Option I	Option II
1	The dimensions of the winding wire of the armature winding, mm×mm	The top of the groove	$2 \times \frac{1,4 \times 5}{1,91 \times 5,51}$	$1 \times \frac{1,9 \times 7,1}{2,34 \times 7,37}$
		The bottom of the groove	$2 \times \frac{1,12 \times 6,3}{1,66 \times 6,84}$	$1 \times \frac{1,9 \times 7,1}{2,34 \times 7,37}$
2	Cross section of armature winding conductors, mm <sup>2</sup>		13,6	13,13
3	The current density in the armature winding, A/mm <sup>2</sup>		5,05	5,24
4	Resistance of the armature winding at operating temperature, Ohm		0,0325	0,0337
5	The mass of the copper armature winding, kg		38,06	37,9
6	The coefficient of increase of resistance for the groove part of the armature winding	The top of the groove	1,29	1,015
		The bottom of the groove	1,524	1,019
7	Losses in the armature winding, Wt	Groove part	1548	1160
		Frontal part	1358	1408
		Total	2906	2568
8	Efficiency, %		91,1	91,32
9	Exceeding the temperature of the armature core, K		42,7	38,4

10	Temperature difference in the thickness of the groove insulation, K	10,47	9,69
11	Exceeding the armature winding temperature, K	31,5	32,6
12	The average excess temperature of the armature winding, K	41,20	39,53
13	Maximum design temperatures °C at ambient temperature 35 °C		
	groove part of the armature winding	108,27	103,09
	front part of the armature winding	86,5	87,6
	core of the anchor	97,7	93,4

Comparison of the results of the calculations given in table. 1, shows the undeniable advantages of using the second option of laying the armature winding according to thermal, energy and economic criteria.

**Conclusions.** Even a cursory comparison of options I and II shows that:

- due to the reduction of current displacement losses in the grooves, option II makes better use of the machine's copper: at lower mass and higher current density, the total losses in the armature winding are less than in the existing design (option I);
- excess and temperature differences, and, as a consequence, heating, in the most critical parts of the machine – core and groove part of the armature winding – less in option II;
- option II requires one winding wire type denomination to perform the armature winding, in contrast to Option I, where two type denominations are required; reducing the range of materials used causes a positive economic effect, reducing the cost of manufacturing and repairing the product.

### References

1. Надійність електричних машин [Електронний ресурс].- Режим доступу до ресурсу: <https://do.ipk.kpi.ua/course/view.php?id=2208>
2. Методика розрахунку двигуна постійного струму [Електронний ресурс].- <https://lemzspb.ru/raschet-dvigatelya-postoyannogo-toka-smeshannogo-vozbuzhdeniya/>
3. Тягові двигуни постійного струму [Електронний ресурс].- Режим доступу до ресурсу: <https://kodtnved.ru/podbor/dvigatel-postoyannogo-toka.html>

## EVALUATION OF COMMUTATION AND CALCULATION OF ADDITIONAL POLES OF THE TRACTION DIRECT CURRENT MOTOR

**Anna Shymanska, Ph.D., Mykola Reutskiy, Ph.D., Andriy Rybalko, student**  
*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Department of Electromechanics*

**Introduction.** The ever-increasing intensity of traffic on urban highways is accompanied by a high deceleration during braking and acceleration when starting moving vehicles. Commutation in direct current (DC) traction motors is a phenomenon caused by a change in the direction of the electric current in the sections of the armature winding of the electric motor during the transition from one parallel branch to another. In other words, this occurs when crossing the line along which the brushes are located. Such processes take place in the collector or commutator.

The commutator is a rotating mechanical transducer that changes the current direction of the current. It consists of a cylinder assembled from a large number of metal contact strips attached to the rotating shaft of the armature (rotor) of the engine [1].

The armature windings are connected to the commutator segments to transmit electric current. Converters are also used in other designs, for example, based on transistors or magnetically controlled contacts. But in the mechanical version, the switches have more advantages, which include compact overall dimensions, energy and other indicators.

When the engine is started, the commutator and the armature winding begin to move in a circle with a certain frequency  $n$ , while the brushes of the device are stationary. Before the start of switching processes, the armature current  $I_a$  flows through the brush, the right collector plate. At this point, it is divided in half between parallel armature windings. At the end of the switching process, conductors 2 and 3 pass into an adjacent parallel branch, while the flow of electric current in them changes to the opposite. The brushes in the motor may overlap several commutator plates during commutation, but this in no way affects the commutation process. The time during which the brush moves from one collector plate to the adjacent one is called the commutation period. It is at this specified point in time that all switching processes take place. This time interval is very short in duration (thousandths of a second).

When the end of the switching process is nearing, the area of the contact surface of the brush and the right plate decreases, and the electric current density increases. After the commutation is completed, the pairing of the brush and the right collector plate breaks, an electric arc is formed. The higher the current strength is, the more powerful the electric arc will be.

There are 3 types of commutation: 1) accelerated curvilinear commutation during which the current density under the part of the brush running onto the plate is higher than under the part running away from it. Brush sparkings are observed; 2) rectilinear commutation when the electric flux density is the same under the running and running edges of the brush. The conductor almost does not spark; 3) slow curvilinear commutation when the electric current density under the incoming edge is lower than under the escaping one. Important indicators of the commutation process are speed of electric current change in the anchor section, current density flowing through the incoming and outgoing plates and continuity of electric current flow.

**The aim of the work** is to evaluate the commutation of a DC traction motor with a power of 150 kW, a nominal speed of 1480 rpm and the possibility of smooth speed regulation in a wide range, and provide recommendations for choosing a method of improving commutation by constructive means.

**Materials of research.** In the working condition the DC motor continuously switches sections of the armature coil from one turn to an adjacent one, and the electric current changes its direction. Due to the fact that such switching periods are short in time, the rate of change of current direction in the section is always quite high. The formed electric arc and the appearance of sparks at the final moment of switching between the brush and collector plates leads to damage to the outer sides of the switch. Its surface burns, as a result, the contact between the brush and the collector deteriorates. Such switching is considered unsatisfactory.

The calculation of the commutation is carried out by using method described in [2]. According to the recommendations calculation of the reactive electromagnetic force (EMF) are follows.

The magnetic conductivities of the slot, which determines the flux coupling of the slot dispersion per unit length of the machine, are

at the nominal speed of rotation  $n_n = 1480 \text{ rpm}$

$$\zeta = 0,6 \times \frac{h_p}{b_p} + \frac{l_s}{l_t} + \frac{500^2}{A \times l_t \times w_c \times V_a} \times \frac{a}{p} = 0,6 \times \frac{35}{10,9} + \frac{39,5}{32} + \frac{500^2}{280 \times 32 \times 1 \times 27,9} \times \frac{2}{2} = 4,16$$

at the maximal speed of rotation  $n_{max} = 3200 \text{ rpm}$

$$\zeta_{max} = 3,62$$

Reactive EMF

at the nominal speed of rotation  $n_n = 1480 \text{ rpm}$

$$e_m = 2 \times l_t \times w_c \times A \times \zeta \times V_a \times 10^{-6} = 2 \times 32 \times 1 \times 280 \times 4,16 \times 27,9 \times 10^{-6} = 2,08 \text{ V}$$

at the maximal speed of rotation  $n_{max} = 3200 \text{ rpm}$

$$e_{rmax} = 3,91 \text{ V}$$

The obtained values are in the permissible range, which ensures satisfactory commutation conditions without a compensating winding.

Union magnetic conductivities

$$\lambda_p = 1,25 \times \left( \frac{h_1}{3b_p} + \frac{h_2}{b_p} \right) = 1,25 \times \left( \frac{14}{3 \times 11,6} + \frac{6}{11,6} \right) = 1,744 \text{ V}$$

$$\lambda_z = \frac{b_{z1}}{2\delta_{ap}} = \frac{13}{2 \times 8} = 0,813$$

$$\lambda_s = 0,5,$$

where  $\delta_{ap} = 8 \text{ mm}$  – gap under the additional pole.

The reduced width of the brush is relative to the reduced width of the brush to the collector division

$$b_b = u_u b_b - \delta_b + \beta_K 1,25 \times \left( 1 - \frac{a}{p} \right) = 1,6 - 0,08 + 0,437 \times \left( 1 - \frac{2}{2} \right) = 1,52 \text{ sm}$$

$$\gamma' = \frac{b_b'}{\beta_K} = \frac{1,52}{0,437} = 3,48$$

For  $\varepsilon_K = 2,5$ ,  $u = 5$ ,  $\gamma' = 3,48$  was defined

$$4u' = f(\varepsilon_K, u, \gamma') = 9$$

Unit resultant conductivity of the groove is

$$\xi' = \frac{4u'}{2\gamma'} (\lambda_p + \lambda_z) + \lambda_s \times \frac{l_s}{l_t} = \frac{9}{23,48} \times (1,744 + 0,813) + 0,5 \times \frac{39,6}{32} = 3,93$$

Reactive EMF

at the nominal speed of rotation  $n_n = 1480 \text{ rpm}$

$$e_m = 2 \times l_t \times w_c \times A \times \xi' \times V_{an} \times 10^{-6} = 2 \times 32 \times 1 \times 280 \times 3,93 \times 27,9 \times 10^{-6} = 1,96 \text{ V}$$

at the maximal speed of rotation  $n_{max} = 3200 \text{ rpm}$

$$e_{rmax} = 4,25 \text{ B}$$

The maximum voltage between adjacent collector terminals is

$$e_{kmax} = \frac{2p \times U_n}{\alpha K} \times K_n = \frac{4 \times 600}{0,665 \times 230} \times 4,49 = 70,45 \text{ V}$$

The obtained result does not allow a double current overload when the field is weakened.



According to the calculations and recommendations described in [3], it is recommended to choose additional poles between the main poles of the motor as a way to improve commutation. Their calculation is given below

Dimensions of the additional pole

$$b_{ap} = b_k - 2\delta_{ap} = 5 - 2 \times 0,8 = 3,4 \text{ sm}$$

$$l_{ap} = l_t = 32 \text{ sm}$$

Induction in the gap of the additional pole

$$B_{ap} = \zeta A \frac{l_t}{l_{ap}} \times 10^{-4} = 3,62 \times 280 \times \frac{32}{32} = 0,1014 \text{ Tл}$$

The gap under the additional pole has been clarified

$$\delta_{ap} = \frac{(k_{ap} - 1) \times \tau}{1,6 \times \zeta \times k_{ap} \times \frac{l}{l_t}} = \frac{(1,3 - 1) \times 28,25}{1,6 \times 3,62 \times 1,125} = 1,3 \text{ sm}$$

Since it was assumed that the gap is 0.8 cm, then between the yoke and the additional pole it is necessary to make a gap of non-magnetic spacers with a thickness of 0.5 cm. It is also worth providing for steel spacers made of sheet steel with a thickness of 0.5 mm.

**Conclusions.** Based on the results of the calculation and evaluation, the following conclusions can be made:

- the calculated values of the reactive EMF are in the range that ensures the specified switching modes at the nominal load;
- the maximum load between the collector plates due to field distortion during overload reaches 70,45 V, which will lead to a circular fire on the collector;
- two-fold current overload with a weakened field is unacceptable;
- the rated operating mode should be considered with a field weakening of 87%. Starting the motor with an armature current of more than 540 A is impossible due to the commutation conditions.

#### - References

- 1. Надійність електричних машин [Електронний ресурс].- Режим доступу до ресурсу: <https://do.ipk.kpi.ua/course/view.php?id=2208>
- 2. Методика розрахунку двигуна постійного струму [Електронний ресурс].-<https://lemzspb.ru/raschet-dvigatelya-postoyannogo-toka-smeshannogo-vozbuzhdeniya/>
- 3. Тягові двигуни постійного струму [Електронний ресурс].- Режим доступу до ресурсу: <https://kodtnved.ru/podbor/dvigatel-postoyannogo-toka.html>