

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ І СИСТЕМ
УПРАВЛІННЯ



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ЩОДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
«ЕЛЕКТРОПРИВОД З АВТОНОМНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЖИВЛЕННЯ»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ДЕННОЇ ТА ЗАОЧНОЇ ФОРМ НАВЧАННЯ
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ
141 – «ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

КРЕМЕНЧУК 2019

Методичні вказівки щодо виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Електропривод з автономними джерелами живлення» для студентів денної та заочної форм навчання зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Укладачі: к. т. н., старш. викл. О. А. Хребтова

Рецензент к. т. н., доц. В. О. Мельников

Кафедра систем автоматичного управління і електроприводу

Затверджено методичною радою Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Протокол ___ від _____ 2019 р.

Голова методичної ради _____ проф. В. В. Костін

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Перелік практичних робіт.....	5
Практична робота №1 Розробка схеми автономної електроенергетичної установки.....	5
Практична робота №2 Вибір та обґрунтування структури силового ланцюга тягового електропривода локомотива.....	16
Практична робота №3 Розрахунок фазних струмів двофазної системи „Автономний інвертор напруги – асинхронний електродвигун”.	24
2 Критерії оцінювання знань студентів.....	37
Список літератури	38
Додаток А Електродвигуни АІР – основні технічні характеристики	39
Додаток Б Вихідні параметри трифазного тягового електродвигуна.....	40

ВСТУП

Навчальна дисципліна «Електропривод з автономними джерелами живлення» покладена в основу навчальної дисциплін, що вивчають прикладні питання побудови, проектування і функціонування систем автоматизованого електроприводу на базі автономних джерел живлення, побудованих з використанням сучасної елементної бази. Метою виконання практичних робіт є оволодіння студентами теоретичними основами синтезу та проектування, практичними навичками експлуатації сучасних систем автоматизованого електропривода з живленням від автономних джерел.

Сучасний етап розвитку електротехніки сприяв розробці та використанню у різних галузях людської діяльності електротранспорту. На сьогодні розрізняють такі транспортні галузі: залізничний, автомобільний, морський, авіаційний, річковий, трубопровідний транспорт. Різні види електричного транспорту значною мірою позбавлені недоліків, притаманних транспорту з тепловими двигунами. Отримуючи живлення від електричних джерел, транспорт перетворює електричну енергію на механічну, що використовується для переміщення вантажів і пасажирів. Електромеханічні трансмісії набули широкого розповсюдження у транспортних засобах завдяки простоті передачі, перетворення і керування електричною енергією. При цьому електричні двигуни не викидають у повітря жодних забруднювальних речовин у газоподібному або рідкому вигляді. Тому електропривод з автономними джерелами живлення має широку сферу застосування.

Метою виконання практичних робіт є закріплення студентами теоретичних знань і набуття практичних навичок розрахунку характеристик тягових електроприводів.

Унаслідок проведення практичних робіт студенти повинні вміти розраховувати необхідні параметри електроприводів; розраховувати статичні, динамічні та енергетичні характеристики електродвигунів постійного та змінного струму; здійснювати вибір елементів силових і керуючих кіл електроприводів з живленням від автономних джерел.

1 ПЕРЕЛІК ПРАКТИЧНИХ РОБІТ

Практична робота № 1

Тема. Розробка схеми автономної електроенергетичної установки

Мета: набути навичок щодо розробки схем електроенергетичної установки та розрахунку параметрів дизель-генераторної установки з асинхронним генератором для обґрунтування вибору елементів установки.

Короткі теоретичні відомості

Для створення будь-якої електроенергетичної установки використовують такі важливі критерії:

- визначення потужності навантаження і раціонального режиму енергоустановки;
- максимальне зниження потужності первинних джерел енергії, достатнього для забезпечення роботи на навантаження;
- оцінювання мінімальної маси і вартості всієї установки, а також окремих її пристроїв;
- отримання залежностей параметрів електроенергетичної установки від режимів споживання навантаженням потужності;
- визначення критичних показників енергоустановки;
- створення алгоритму управління роботою пристроїв;
- визначення усіх техніко-економічних показників енергоустановки.

До складу будь-якої автономної електроенергетичної установки входять такі елементи (рис. 1.1): ПДЕ – первинне джерело енергії; СО – система охолодження; ІЕЕ – джерело електроенергії; РУ – розподільчий пристрій; БРЗУ – блоки регулювання, захисту і управління; РПЕ, РІЕЕ – резервні джерела електричної енергії; П – перетворювачі електроенергії; К – комутаційна апаратура; НЕ – накопичувачі енергії.

Як окремі елементи в цю схему вводять і лінії передач, але через незначний їх вплив, створювані цими лініями ефекти, ураховують у характеристиках комутаційної апаратури і розбіжностях пристроїв ділення.

Кожен з елементів блока повинен і забезпечувати оптимальні режими електроенергетичної установки, і мати задані характеристики.

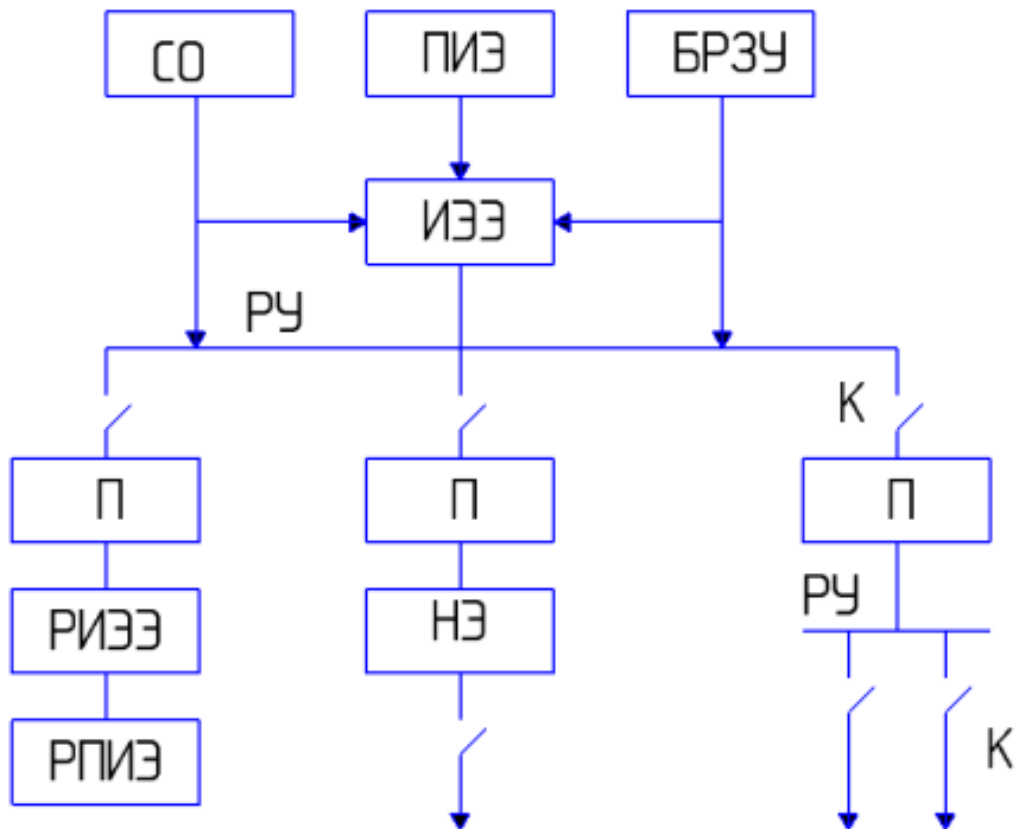


Рисунок 1.1 – Структурна схема автономної електроенергетичної установки

Усі установки розрізняються величиною виробленої напруги: 12 В–10 кВ, номінальною потужністю: 1–10 5 кВт; частотою струму: 0–5 кГц; видом первинного двигуна, видом генератора, а також способом його охолодження; умовами експлуатації, призначенням та іншими параметрами.

Схема автономної електроенергетичної установки неведена на рис. 1.2. Принцип роботи схеми полягає в обертанні ротора генератора Г двигуном внутрішнього згорання (ДВЗ). Згодом на генератор регулятором напруги (РН) наводить струм збудження. Необхідна напруга знімається з обмотки статора і надходить у мережу. Датчики напруги (ДН) і частоти обертання датчика

обертання (ДО) знімають відповідні їм у даний момент величини, які в подальшому надходять на регулятори.

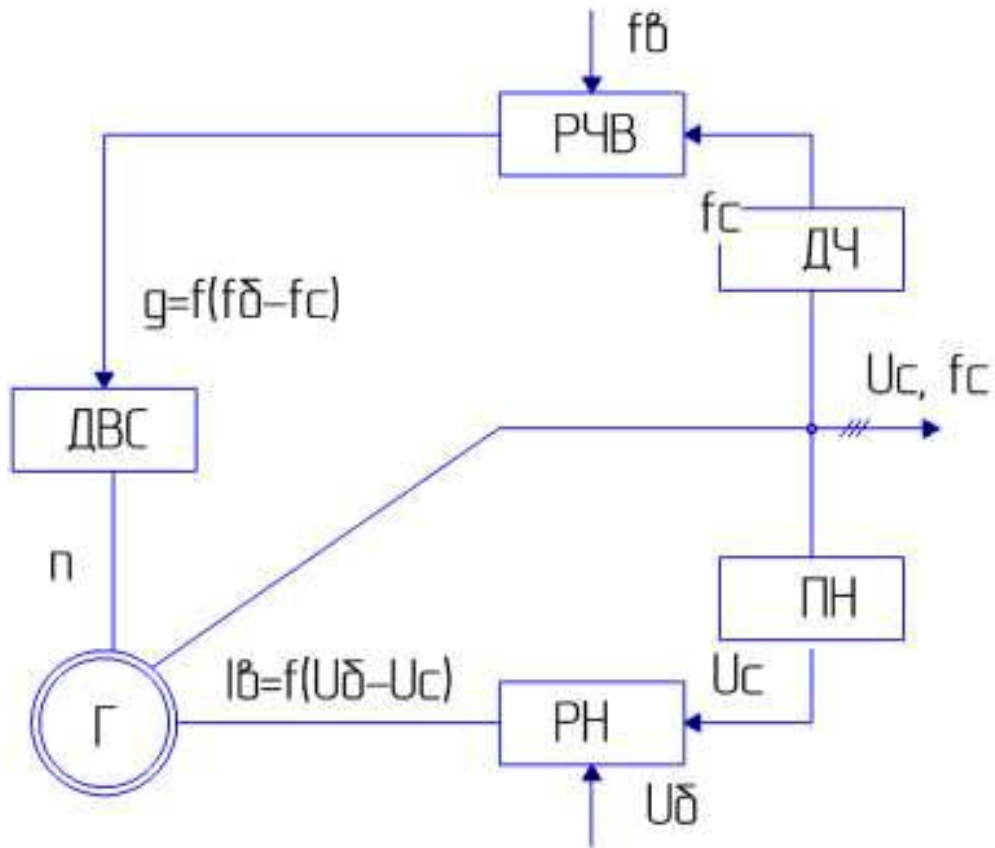


Рисунок 1.2 – Схема автономної електроенергетичної установки

Регулятором напруги здійснюється управління струмом збудження генератора (функцією різниці початкового і дійсного значень напруги мережі), забезпечуючи із заданою точністю стабілізацію вихідної напруги, наближеної до бажаної напруги, з різними видами і значеннями навантаження. Регулятор частоти, відповідно до навантаження, зменшує або збільшує кількість палива, що подається у двигун, і змінює частоту обертання вала.

Розрахунок параметрів і вибір силового устаткування

Вибір генератора

Як генератор був вибраний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу АІРС160S4, номінальні дані наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Номінальні дані генератора

Найменування параметрів	Числове значення
Напруга мережі, В	380/660
Частота, Гц	50
Тип генератора	AIPC160S4
Номінальна потужність, кВт	15
Частота обертання умовна (реальна), об/хв	1500 (1460)
ККД, %	89,4
Струм, А	30
I пуск/I ном	7,5
M пуск/M ном	2,2
M макс/M ном	2,3
Коефіцієнт потужності	0,85
Момент інерції ротора, кг · м ²	0,06
Маса генератора, кг	125

Номінальна потужність генератора розраховується за формулою:

$$S_{ном} = \sqrt{3} I_{ном} U_{л}, \quad (1.1)$$

$$S_{ном} = \sqrt{3} \cdot 30 \cdot 380 = 19,7 \text{ кВА.}$$

Оскільки величина коефіцієнта потужності $\cos\varphi$ під час роботи на АВ наближена до номінального значення, отже, величина номінальної активної потужності АГ розраховується за формулою:

$$P = S_{ном} \cos\varphi_{ном}, \quad (1.2)$$

$$P = 19,7 \cdot 0,85 = 16,7 \text{ кВА.}$$

Вибір дизельного двигуна

Необхідний крутний момент, створюваний дизельним двигуном, визначимо з умови, що у сталому режимі момент двигуна внутрішнього згорання дорівнює моменту, необхідного асинхронній машині для роботи в генераторному режимі на номінальне навантаження.

Отже, крутний момент дизельного двигуна знаходимо відповідно до формули:

$$M = \frac{P}{\eta \omega_n}, \quad (1.3)$$

де η – ККД асинхронної машини; ω – частота обертів.

$$P = 19,7 \cdot 0,85 = 16,7 \text{ кВА} .$$

Беручи до уваги крутний момент, номінальну потужність і номінальну частоту обертання, виберемо дизельний двигун Perkins 403D-22G, номінальні дані якого наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Номінальні дані дизеля

Найменування параметрів	Числове значення
Основна (номінальна) потужність, кВт	18,7
Резервна (максимальна) потужність, кВт	20,6
Тип двигуна дизельний	4-тактний
Робочий об'єм двигуна, л	2,216
Число, розташування циліндрів	4, рядне
Порядок роботи циліндрів	1-3-4-2
Діаметр циліндра/хід поршня, мм	84 x 100
Ступінь стиснення,	23,3: 1
Номінальна частота обертання, хв ⁻¹	1500

Вибір частотного перетворювача

Частотний перетворювач з проміжною ланкою постійного струму, необхідного для реалізації схеми з повним перетворенням енергії АГ, вибирають за номінальною напругою 380 В, номінальною потужністю 15 кВт та номінальним струмом 30 А.

На підставі вище перелічених даних був вибраний частотний перетворювач HYUNDAI N700V-220HF. Номінальні дані перетворювача частоти наведені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Номінальні дані частотного перетворювача HYUNDAI N700V-220HF

Тип мережі	Трифазна
Частота, Гц	50/60
Потужність двигуна, кВт	20
Номінальний струм двигуна, А	40
Номінальна вхідна напруга, В	380-480
Перевантажувальна здатність, %	150 при 60 с
Вибір напруги живлення двигуна, В	Установлюється пропорційно напрузі мережі – 380/400/415/440/460/480; заводська установка - 440
Номінальна вихідна напруга, В	380-480
Діапазон вихідних частот, Гц	0,1 –400
Гальмування	Динамічне гальмування (короткочасне). Вбудований ланцюг BRD (розрядний резистор є опціональним)
Час прискорення і гальмування, хв	0,1 – 3600 (лінійні/нелінійні значення установки)
Метод управління	ШІМ система модуляції просторового вектора

Оскільки в установці з використанням активного випрямляча усі елементи з'єднані послідовно, то сумарний ККД являє собою множник ККД усіх складових ДГУ:

$$\eta_{AB} = \eta_{инв}^2 \eta_{AG} \eta_{\phi}, \quad (1.4)$$

де η_{AG} – ККД асинхронного генератора; η_{ϕ} – ККД згладжує LC-фільтри;
 $\eta_{инв}$ – ККД автономного інвертора напруги (АІН).

На рис 1.3 подані залежності ККД IGBT-інверторів трьох поколінь від коефіцієнта завантаження, де 100 % відповідають номінальній потужності навантаження. Виберемо найсучасніше покоління МПК300Н, відповідно $\eta_{інв} = 90 \%$. ККД ДГУ з використанням активного випрямляча:

$$\eta_{AB} = 0,9^2 \cdot 0,84 \cdot 0,95 = 0,68$$

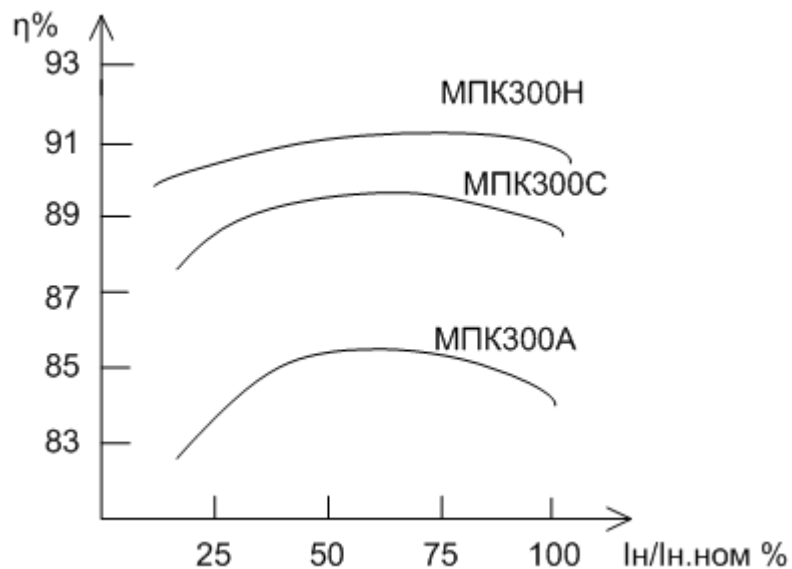


Рисунок 1.3 – Залежності ККД IGBT-інверторів від коефіцієнта завантаження

Величину струму ДГУ короткого замикання можна обмежити за допомогою автоматичного регулювання АІН унаслідок використання зворотного зв'язку відсічки за струму навантаження.

Вибір конденсаторної батареї

Як джерело постійної напруги використовують конденсаторні батареї, хоча, як альтернатива, можливе використання акумуляторної батареї, що значно полегшує оптимізацію всієї дизель-генераторної установки у зв'язку з відсутністю у ній коливальних процесів, пов'язаних з періодичною роботою конденсаторів. Але для цього потрібно додатково виконати роботи щодо розробки та оптимізації акумуляторної батареї.

Так само варто врахувати більш низьку собівартість конденсаторів, відповідно менші витрати на амортизацію установки і, як наслідок, зменшення ціни всієї дизель-генераторної установки.

Визначимо повну ємність батареї, розташованої в ланці постійного струму, що використовується як компонент фільтра, що згладжує, а також здійснює збудження асинхронного генератора.

Для визначення ємності будемо враховувати такі параметри – номінальної потужності АГ, напруги в ланці постійного струму, що надходить на вхід автономного інвертора напруги, а також глибини розряду конденсаторів (візьмемо стандартно 50 %).

Отже, для того, щоб на виході АІН отримати задані споживачем 380 В, на вході АІНа необхідно сформуванати напругу величиною в 540 В (оскільки значення постійної напруги стане амплітудним змінного, а, як відомо, середньоквадратичне значення, тобто діюче значення, становить $1/\sqrt{2}$ від амплітудного). Також необхідно врахувати падіння напруги на дроселях і ємностях фільтрів; транзисторах АІН і активного випрямляча; а також проводах. Як підсумок отримуємо напругу 545–550 В.

$$U_{інв} = \sqrt{2}U = \sqrt{2} \cdot 380 = 540 \text{ В.}$$

Щоб розрахувати ємність конденсаторних батарей, скористаємося найпростішим методом визначення ємності (загальноприйнятим на деяких виробництвах) – використанням коефіцієнта k :

$$C = kP_{ном} = 1500 \text{ мкФ,}$$

де C – ємність батареї, мкФ; $P_{ном}$ – номінальна потужність асинхронної машини, кВт.

Значення коефіцієнта k вибрано рівним 100, хоча дана постійна може різнитися у різних виробників. Як підсумок, на кожен 1 кВт потужності асинхронного двигуна припадає 100 мкФ ємності батареї конденсаторів.

Захисні пристрої

У разі повного закриття усіх транзисторів на IGBT-інверторі напруга залишиться тільки в ланці постійного струму, і йому необхідно буде десь розрядитися. Так, якби не було жодного опору, то вся напруга перетворилася б на струм, який протікав би по дротах цієї ланки. А оскільки довжина проводів тут дуже мала, то вся енергія, пропорційна квадрату струму (або у цьому разі квадрату напруги і обернено пропорційна опору, при тому, що з опорів є тільки одні дроти), виділилася б на дротах ланки постійного струму, що призвело до їх перегріву, і, як результат, відбувся обрив ланцюга.

Тому спеціально був застосований так званий розрядний резистор (рис. 1.4), на якому і відбувається виділення усієї енергії, що накопичується на конденсаторних батареях (контур «Захист від перенапруг», що складається з одного транзистора, одного резистора і батареї конденсаторів).

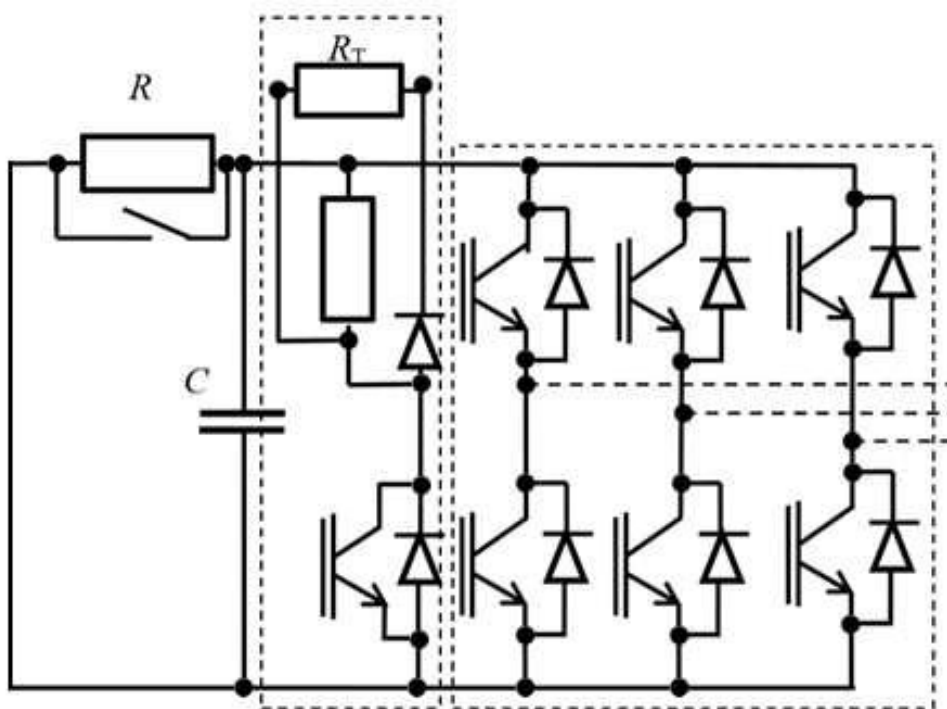


Рисунок 1.4 – Застосування зарядного і розрядного резисторів у перетворювачі частоти

У разі замикання транзистора, що залишився, утворюється ще один контур, що складається з резистора R_t і діода. Як підсумок розрядка відбудеться на резисторі R_t . Хоча у цьому разі можна обійтися і зовсім без

резистора, тому що розрядні резистори установлюються зазвичай на великому видаленні, і, як наслідок, утворений таким способом ланцюг з довгими замкнутими накоротко дротами дозволить рівномірно розподілити на них усе виділилося, без шкоди для дротів, або ізоляції цих дротів.

Розглянемо випадок, коли конденсаторна батарея має нульову напругу. У цьому разі в контурі, що складається тільки з батареї конденсатора і дротів, потече зарядний струм, значення якого в кілька разів перевищує значення струму зі сталому напруженні батареї.

В даному випадку з дротами виникає проблема, аналогічна під час розрядки.

Отже, в даному випадку мета обмеження цього зарядного пікового струму – застосований зарядний резистор R . Він підключається лише до моменту досягнення на конденсаторній батареї робочого усталеного значення напруги, що становить приблизно від кількох десятих до декількох секунд. Далі відбувається замикання ключа.

Вибір активного динамічного фільтра

Вибір активного динамічного фільтра, необхідного для реалізації схеми з повним перетворенням енергії, здійснювався з урахуванням номінальної напруги 380 В і номінального струму 30 А. Так, був обраний АДФ 3A025F5ACHXF, технічні характеристики, якого наведені в табл. 1.4.

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики АДФ 3A025F5ACHXF

Найменування параметрів	Числове значення
Компенсація фазного струму гармонік, А	25
Випереджальний реактивний струм, А	14
Загальний компенсований струм, А	29
Напруга, В	380–415
Частота, Гц	50–60
Поправкова реактивна потужність, квар	9,3
Потужність утрати, КВт	0,6

Оскільки в активному динамічному фільтрі відсутня активна потужність, повна потужність знаходиться за формулою:

$$S_{АДФ} = Q_{АДФ} = Q_{ХХ} + Q_n, \quad (1.5)$$

де $Q_{ХХ}$ – реактивна потужність АДФ на холостому ході; Q_n – реактивна складова потужність АДФ на навантаженні.

Оскільки струм холостого ходу складає 30 % від номінального, реактивна потужність АДФ на холостому ході:

$$Q_{ХХ} = 0,3 \cdot \sqrt{3} I_{ном} U_n = 0,3 \cdot 19,7 = 5,91 \text{ кВАр.}$$

Реактивна складова потужність АДФ на навантаженні:

$$Q_n = P_n \operatorname{tg} \varphi_n = 0,75 \cdot 15 = 11,25 \text{ кВАр.}$$

ККД ДГУ з використанням АДФ:

$$\eta_{АДФ} = 1 - \frac{\Delta P_{АГ} + \Delta P_{АДФ}}{P_n} = 1 - \frac{(1 - \eta_{АГ})P + (1 - \eta_{інв})S_{АДФ}}{P_n};$$
$$\eta_{АДФ} = 1 - \frac{(1 - 0,894) \cdot 16,7 + (1 - 0,9) \cdot 17,6}{15} = 0,768.$$

Отже, з використанням АДФ як статичного перетворювача втрати менші, ніж з використанням АВ, і застосування АДФ економічно доцільніше використовувати на потужностях, близьких до номінальної.

Завдання до теми

Згідно з варіантом завдання (додаток А, табл. А.1) для дизель-генераторної установки з асинхронним генератором за отриманими розрахунковими параметрами обґрунтувати і вибрати елементи автономної електроенергетичної установки.

Контрольні питання

1. Поясніть принцип роботи системи автономної електроенергетичної установки.

2. За якими критеріями виконується вибір генератора?

3. Які розрахунки необхідно виконати під час вибору дизельного двигуна для автономної електроенергетичної установки?

4. За якими вимогами вибирають елементи керування генератором для автономної електроенергетичної установки?

5. Поясніть технологічну необхідність у використанні конденсаторних батарей в автономній електроенергетичній установці та за якими умовами вони вибираються.

6. Що являє собою вибір активного динамічного фільтра для автономної електроенергетичної установки?

Практична робота № 2

Тема. Вибір та обґрунтування структури силового ланцюга тягового електропривода локомотива

Мета: набути навичок обґрунтування та опанування методами розрахунку і вибору елементів силових складових системи тягового електропривода локомотива.

Короткі теоретичні відомості

Електричні передачі змінного струму складаються з тягового синхронного генератора змінного струму СГ, статичного перетворювача частоти РПЛ і асинхронних короткозамкнених тягових електродвигунів АТД змінного струму. Такі передачі застосовані на тепловозах ВМЕ1, ТЕ120, ТЕМ21. Асинхронні двигуни мають значні переваги над електричними машинами постійного струму (простота пристрою, експлуатаційна надійність, висока питома потужність, жорстка природна характеристика, зменшення витрати міді, зниження витрат на обслуговування і ремонт та інші), що робить передачу змінного струму досить перспективною для застосування на тепловозах. Очевидна ефективність застосування таких передач на маневрових тепловозах. При цьому спрощується система повної автоматизації управління роботою такого локомотива.

Застосування на вітчизняних тепловозах передач змінного струму

стримувалося відсутністю надійних і економічних статичних перетворювачів частоти змінного струму, що складаються з випрямної установки та інвертора. Природна жорсткість характеристик АТД призводить до того, що під час зміни зовнішніх навантажень у широких межах частота їх обертання у робочому діапазоні майже не змінюється. Зміна величини обертання нерегульованого електродвигуна залежить від ковзання ротора і становить приблизно 1–2 %.

Частота обертання ротора асинхронного тягового електродвигуна тепловоза визначається за таким виразом:

$$n_{\text{АТД}} = \frac{60(f_1 - f_p)}{p},$$

де p – число пар полюсів; f_1 – частота напруги живлення U_r , Гц; f_p – частота ковзання ротора, Гц.

Величина ковзання ротора змінюється від $s = 1$ з нерухомим ротором до $s = 0$ зі синхронним режимом його роботи.

Регулювати частоту обертання ротора асинхронного тягового електродвигуна змінного струму можна зміною числа пар полюсів p або частоти напруги живлення f_1 .

Другий спосіб регулювання електродвигуна змінного струму, тобто регулюванням напруги живлення, виявився більш простим і ефективним для цілей локомотивної тяги і має практичне застосування на досвідчених тепловозах.

Для стійкої роботи асинхронного короткозамкненого двигуна як привода транспортного засобу необхідно здійснювати одночасну зміну ряду параметрів струму живлення. Оптимальне співвідношення цих параметрів струму подано у вигляді такого виразу:

$$\frac{U_1}{U_{\text{ном}}} = \frac{f_1}{f_{\text{ном}}} \sqrt{\frac{M_1}{M_{\text{ном}}}},$$

де U_1 і $U_{\text{ном}}$ – дійсна і номінальна напруга АТД, В; f_1 і $f_{\text{ном}}$ – дійсна і номінальна частоти напруги живлення, Гц; M_1 і $M_{\text{ном}}$ – дійсне і номінальне значення крутного моменту на роторі АТД, Н/м.

Оптимальний режим роботи асинхронного тягового електродвигуна визначається співвідношенням трьох його параметрів: напруги, його частоти і величини крутного моменту. Такий режим роботи АТД відповідає режиму постійної потужності, що забезпечує найкращі значення ККД передачі та тепловоза в цілому. Для регулювання частоти обертання ротора АТД на досвідчених вітчизняних тепловозах змінного струму використовують статичні перетворювачі частоти, що складаються з випрямної установки і автономного інвертора струму.

Електрична передача змінного струму маневрового тепловоза ТЕМ21, побудованого на Брянському машинобудівному заводі, складається (рис. 2.1) з синхронного тягового генератора змінного струму, двох статичних перетворювачів частоти і чотирьох асинхронних тягових електродвигунів ДАТ–305.

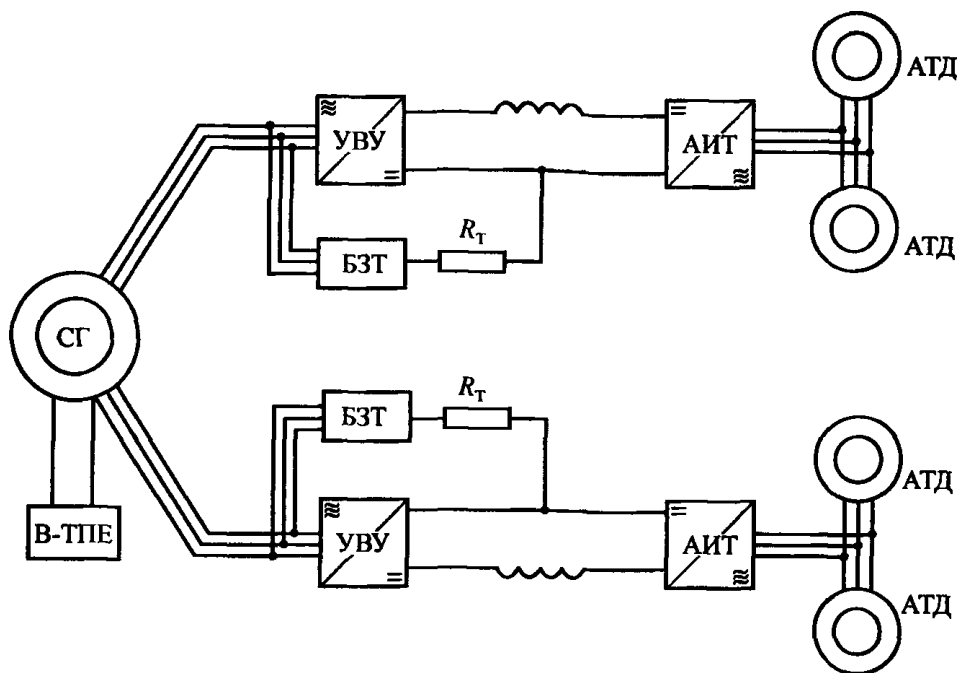


Рисунок 2.1 – Принципова схема електричної передачі змінного струму тепловоза ТЕМ21: СГ – синхронний тяговий генератор; УВУ – керована випрямна установка; АИТ – автономний інвертор струму; БЗТ – блок замикальних (гальмівних) тиристорів; В-ТПЕ – керований вентиль ланцюга збудження СГ; R_T – опір гальмівних резисторів; АТД – асинхронний тяговий електродвигун

Синхронний тяговий генератор ГСТ1050–1000, що має три трифазні обмотки (дві тягові і третя – для живлення електроприводів допоміжних машин), за допомогою напівжорсткої муфти з'єднаний з колінчастим валом дизеля 2–6Д49 потужністю 1100 кВт.

Кожен зі статичних перетворювачів частоти СПЧ складається з трифазної керованої випрямної установки КВУ і автономного інвертора струму АІС та призначений для регулювання частоти і амплітуди напруги живлення асинхронних тягових електродвигунів. Асинхронні тягові електродвигуни АТД попарно підключені до статичних перетворювачів. Реверсування АТД здійснюється зміною послідовності чергування фаз живильного струму. Живлення обмотки збудження синхронного генератора змінного струму виробляється від допоміжної обмотки СГ через керований випрямляч В–ТПЕ. Система збудження СГ функціонує за принципом прямого самозбудження з початковим підбудженням від джерела постійного струму.

Як привод допоміжних машин і механізмів тепловоза ТЕМ21 застосовані електродвигуни змінного струму. На тепловозі ТЕМ21 встановлена система електричного реостатного гальмування, яка є допоміжним гальмом локомотива. Для управління значенням гальмівної сили локомотива під час електричного гальмування використовується блок гальмівних (замикальних) тиристорів (БЗТ), за допомогою якого забезпечується задане перемикання груп гальмівних резисторів RT під час гальмування і в режимі навантаження дизеля за допомогою реостата. Тепловоз ТЕМ21 обладнаний бортовою мікропроцесорною системою управління, контролю і діагностики, яка забезпечує автоматичне керування роботою локомотива в тяговому і гальмівному режимах.

Приклади розв'язання завдань

Завдання. Вибрати та обґрунтувати структуру силового ланцюга тягового електропривода локомотива. Вибрати та обґрунтувати схему автономного

інвертора напруги. Вибрати форми напруги для живлення автономного інвертора напруги.

Вихідні параметри для розрахунків наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні параметри трифазного тягового електродвигуна НБ–607

Величина	Позначення	Значення	Розмірність
Напруга живлення	U_d	1500	В
Активний опір статора	r_1	0,016	Ом
Приведений активний опір ротора	r'_2	0,016	Ом
Реактивний опір статора	x_{1H}	0,11	Ом
Приведений реактивний опір ротора	x'_{2H}	0,188	Ом
Опір контуру намагнічування	x_{OH}	4,9	Ом
Базова частота	f_{1H}	51,5	Гц
Частота струму статора	f_1	70	Гц
Частота ковзання	f_2	-0,6	Гц
Коефіцієнт схеми з'єднання	q	0,5	
Кут зпрацювання	γ	$\pi/3$	

1. Вибір та обґрунтування силової схеми тягового електропривода локомотива.

Застосуємо у тяговому електроприводі локомотива замість машин постійного струму асинхронні тягові електродвигуни з короткозамкненим ротором, які на сьогодні широко застосовуються, у тому числі й на транспорті.

Для регулювання частоти обертів ротора (у широкому діапазоні швидкостей) таких двигунів необхідно їх живити багатофазною ($m_1 \geq 2$) зміною напруги регульованої частоти.

На електрорухомому складі постійного струму вхідний перетворювач – автономний інвертор напруги, який через вхідний фільтр безпосередньо або через імпульсний перетворювач приєднаний до контактної мережі.

На сучасних автономних локомотивах з електричною передачею як джерело електроенергії використовується синхронний генератор (СГ), напруга СГ попередньо перетворюють у постійну напругу, величина якої може стабілізовано змінюватися за необхідним законом.

Згідно з теоретичними та експериментальними дослідженнями, суттєве поліпшення режимів роботи асинхронного тягового електропривода з перетворювачами частоти може бути отримано з використанням у тяговому електроприводі двофазних асинхронних короткозамкнених електродвигунів. Водночас із застосуванням традиційних трифазних асинхронних електродвигунів існують проблеми, які зумовлені із умовами їх сумісної роботи з напівпровідниковими ним перетворювачами частоти.

Тому можливо використати трифазні асинхронні двигуни на тяговому рухомому складі. Використання трифазних електродвигунів насамперед пов'язано з поліпшенням умов сумісної роботи асинхронного двигуна. Відповідно змінюється структура та топологія вхідного перетворювача, а загалом, схемотехніка тягового електроприводу суттєво спрощується.

Отже, вибираємо силову схему з імпульсним перетворювачем знижувального типу, трифазними мостовим інвертором, який живить два паралельно увімкнених асинхронних тягових двигунів. Цим досягаємо напруги 3 кВ на кожному з візків та 1,5 кВ на кожен з однофазних мостових інверторів, отже, і на ізольованих обмотках статора.

2. Вибір та обґрунтування схеми автономного інвертора напруги.

Слід відмітити, що у інверторному електроприводі загальне розповсюдження отримав традиційний трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором, і зусилля розробників були направлені переважно на відпрацювання схемотехніки і режимів перетворювачів частоти за їх сумісної роботи з трифазною машиною, на вдосконалення конструкції трифазного електродвигуна для зниження впливу високих гармонік струму, викликаних несинусоїдальністю живильних напруг.

Проте одним із найбільш перспективних напрямів удосконалення сучасних систем асинхронного електропривода є застосування двофазних тягових блоків «автономний інвертор напруги–асинхронний двигун».

Тягові електроприводи із трифазним асинхронним електродвигуном, у тому числі і частотно-управляючі, на практиці не застосовуються. Найбільш раціональна система живлення трифазного асинхронного двигуна будується на основі трифазних мостових інверторів на керуючих замикальних тиристорах (рис. 2.2).

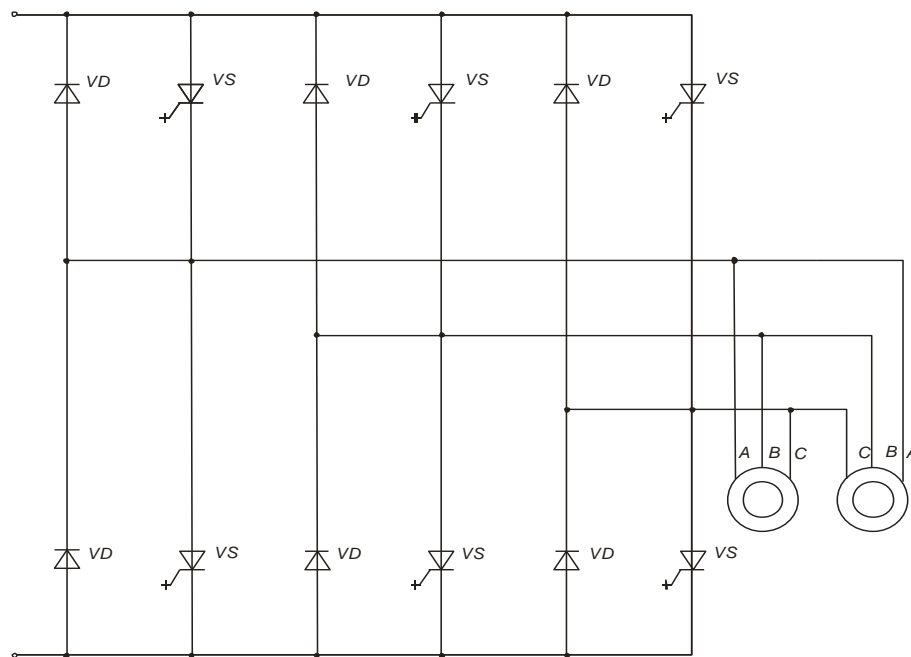


Рисунок 2.2 – Трифазний мостовий інвертор

3. Вибір форми напруги для живлення автономного інвертора напруги.

Оптимальною є форма кривої фазної напруги, яка має високий зміст першої гармоніки у загальному дійсному значенні, забезпечує умови електромагнітної сумісності АІН–АД у всіх робочих режимах, не призводить до ускладнення схемотехніки АІН. Цим умовам відповідають криві фазної напруги, які формують годограф вектора магнітного поля у повітряному зазорі АД у вигляді правильного вписаного багатокутника з числом сторін N . Очевидно, чим більше N , тим ближче годограф магнітного поля у повітряному

зазорі АД до кругового, який відповідає живленню АД синусоїдальною напругою.

Якщо за основу взяти триступеневу на половинному значенні періоду загальну криву фазної напруги, показану на рис. 2.3, можна отримати магнітне поле трифазного АД більш наближене до кругового ($N = 8$ та $N = 12$).

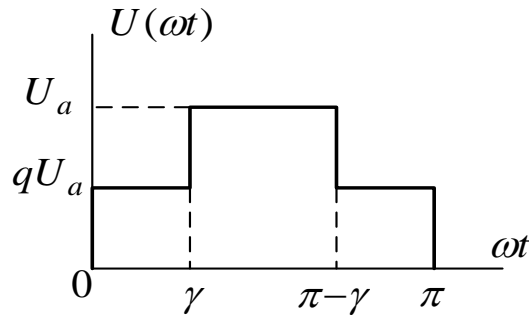


Рисунок 2.3 – Двоступенева форма вихідної фазної напруги двофазного автономного інвертора напруги

З рис. 2.2 видно форму фазної напруги, а гармонійний склад напруги описується такими рівняннями:

$$\frac{4 \cdot U_m}{\vartheta \cdot \pi} \cdot \sum_{\vartheta=1}^{\infty} \cos\left(\frac{\vartheta \cdot \pi}{4}\right) \cdot \sin \vartheta \theta, \quad (1.1)$$

де $\vartheta = 4 \cdot n \pm 1; n = 0, 1, 2, \dots$

Годограф магнітного поля наближається до форми правильного восьмикутника, вписаного в коло, а вміст першої гармоніки у діючому значенні дорівнює 0,955.

Завдання до теми

Згідно з варіантом завдання (додаток А, табл. А.1) для прототипу електропривода локомотива:

- 1) обґрунтувати та вибрати структури силового ланцюга тягового електропривода;
- 2) за розрахунковими даними обґрунтувати та вибрати схеми автономного інвертора напруги;
- 3) вибрати форми напруги для живлення автономного інвертора напруги.

Контрольні питання

1. Наведіть вимоги до силових ланцюгів тягового електропривода.
2. Методи поліпшення режимів роботи асинхронного тягового електропривода.
3. Поясніть особливості конструкції трифазного електродвигуна для зниження впливу високих гармонік струму.
4. Наведіть схеми автономного інвертора напруги і вкажіть переваги та їх недоліки.
5. Поясні значення «оптимальна форма кривої фазної напруги».

Практична робота № 3

Тема. Розрахунок фазних струмів двофазної системи «Автономний інвертор напруги–синхронний електродвигун»

Мета: опанувати методи і набути навичок розрахунку потужності фазних струмів двофазної системи „Автономний інвертор напруги – асинхронний електродвигун”.

Приклади розв’язання завдань

Розрахунок ведемо методом двох складових, який ґрунтується на методах гармонійних складових і еквівалентного статичного навантаження.

Струм фази $i_{\phi}(\theta)$ двофазної системи АІД–АД можна подати у вигляді двох складових: струму першої гармоніки $i_1(\theta)$, що залежить від частоти обертання ω_p ротора АД, і суми струмів усіх вищих гармонік $i_e(\theta)$, що практично не залежить від ω_p :

$$i_{\phi}(\theta) = i_1(\theta) + i_e(\theta) \quad (3.1)$$

Схема заміщення обертового двигуна наведена на рис. 3.1.

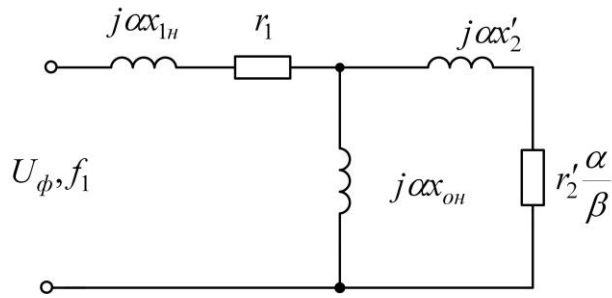


Рисунок 3.1 – Схема заміщення обертового двигуна

де r_1 – активний опір статора; r'_2 – активний опір ротора, приведений до опору статора; x_{1H} – індуктивний опір статора; x'_2 – індуктивний опір ротора, приведений до індуктивного опору статора; x_{OH} – індуктивний опір намагнічувального контуру.

Параметри ковзання знаходимо за виразами:

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1H}}, \quad (3.2)$$

$$\beta = \frac{f_2}{f_{1H}}, \quad (3.3)$$

де f_1 – частота струму статора; f_2 – частота ковзання; f_{1H} – базова частота.

$$a = \frac{51,5}{70} = 1,35; \quad \beta = \frac{51,5}{-0,6} = -0,012.$$

Розраховуємо загальний активний опір за формулою:

$$r_{\vartheta} = r_1 + \frac{\alpha \cdot \beta \cdot x_{OH}^2 \cdot r'_2}{r'_2{}^2 + (x_{OH} + x'_{2H})^2 \cdot \beta^2}, \quad (3.4)$$

$$r_{\vartheta} = 0,016 + \frac{1,359 \cdot (-0,012) \cdot 4,9^2 \cdot 0,016}{0,016^2 + (4,9 + 0,188)^2 \cdot (-0,012)^2} = -0,1598 \text{ Ом.}$$

Розраховуємо загальний реактивний опір за формулою:

$$x_{\vartheta} = \alpha \cdot x_{1H} + \alpha \cdot x_{OH} \cdot \frac{(r'_2)^2 + x'_{2H} \cdot (x'_{2H} + x_{OH}) \cdot \beta^2}{(r'_2)^2 + (x'_{2H} + x_{OH})^2 \cdot \beta^2}; \quad (3.5)$$

$$x_3 = 1,359 \cdot 0,11 + 1,359 \cdot 4,9 \cdot \frac{(0,016)^2 + 0,188 \cdot (0,188 + 4,9) \cdot (-0,012)^2}{(0,016)^2 + (0,188 + 4,9)^2 \cdot (-0,012)^2} = 0,831 \text{ Ом.}$$

Еквівалентний опір розраховуємо за формулою:

$$z_{\epsilon} = \sqrt{r_{\epsilon}^2 + x_{\epsilon}^2}, \quad (3.6)$$

$$z_3 = \sqrt{(-1,598)^2 + 0,831^2} = 1,801 \text{ Ом.}$$

Амплітудне значення напруги U_a :

$$U_a = \frac{2}{3} \cdot U_d, \quad (3.7)$$

$$U_a = \frac{2}{3} \cdot 1500 = 1000 \text{ В.}$$

Амплітудне значення напруги першої гармоніки фазної напруги:

$$U_{1a} = \sqrt{2} \cdot U_1 = \frac{4}{\pi} U_a [q + (1-q) \cos \gamma]; \quad (3.8)$$

$$U_{1a} = \frac{4}{3,14} \cdot 1000 \cdot [0,5 + (1-0,5) \cdot \cos(\frac{\pi}{3})] = 954,93 \text{ В.}$$

Амплітудне значення струму першої гармоніки I_{1a} :

$$I_{1a} = \frac{U_{1a}}{z_3}, \quad (3.9)$$

$$I_{1a} = \frac{1000}{1,801} = 530,23 \text{ А.}$$

Кут зміщення φ_1 :

$$\varphi_1 = \arctg \frac{x_3}{r_3}, \quad (3.10)$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{0,831}{-1,598} = 0,48 \text{ рад} = 27,5 \text{ град.}$$

Струм першої гармоніки $i_1(\theta)$ на періоді 2π знаходимо за формулою:

$$i_1(\theta) = I_{1a} \sin(\theta - \varphi_1). \quad (3.11)$$

Розрахунки наведемо в табл. 3.1.

Таблиця 3.1– Розрахунок струму фази $i_l(\theta)$

θ , град	$i_l(\theta)$, А	$I_{lk}(\theta)$, А	$ik(\theta)$, А	$i_v(\theta)$, А	$i_\phi(\theta)$, А
0	240,719	-2398,912	-2635,539	-236,627	4,092
10	319,100	-2329,682	-2380,571	-50,889	268,211
20	387,785	-2189,666	-2129,048	60,618	448,404
30	444,688	-1983,118	-1880,923	102,195	546,883
40	488,079	-1716,315	-1636,151	80,163	568,243
50	516,640	-1397,362	-1394,687	2,675	519,315
60	529,503	-1035,951	-1156,485	-120,534	408,969
70	526,278	-643,063	-702,205	-59,141	467,137
80	507,062	-230,636	-254,004	-23,368	483,694
90	472,439	188,798	188,141	-0,658	471,781
100	423,461	602,496	624,311	21,814	445,275
110	361,617	997,888	1054,587	56,699	418,316
120	288,785	1362,959	1479,049	116,090	404,875
130	207,178	1686,618	1678,264	-8,354	198,825
140	119,277	1959,029	1874,943	-84,087	35,190
150	27,751	2171,917	2068,964	-102,953	-75,202
160	-64,617	2318,812	2260,364	-58,449	-123,066
170	-155,023	2395,251	2449,177	53,925	-101,097
180	-240,718	2398,912	2635,439	236,527	-4,191

Складову суми струмів вищих гармонік можна подати у вигляді:

$$i_e(\theta) = i_k(\theta) + i_{1k}(\theta), \quad (3.12)$$

де $i_k(\theta)$ – реакція схеми заміщення загальмованого АД на прикладену східчасту напругу; $i_{1k}(\theta)$ – струм першої гармоніки в режимі загальмованого АД.

Якщо двигун загальмований, то частота струму дорівнює частоті мережі, тобто $f_2 = f_1$, а з цього $\beta = \alpha$.

Схема заміщення загальмованого двигуна наведена на рис. 3.2.

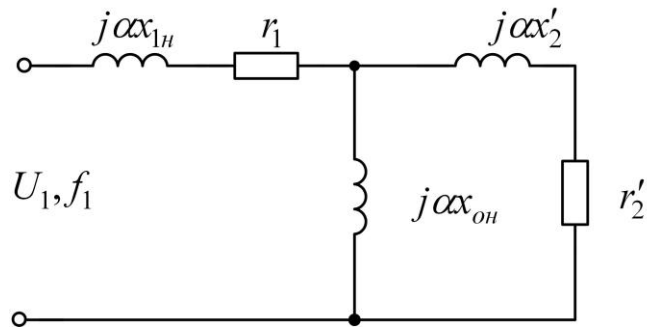


Рисунок 3.2 – Схема заміщення загальмованого двигуна

Загальний активний опір загальмованого двигуна $r_{ке}$ знаходимо за формулою:

$$r_k = r_1 + \frac{\alpha^2 \cdot x_{OH}^2 \cdot r'_2}{r'_2{}^2 + \alpha^2 \cdot (x_{OH} + x'_{2H})^2}, \quad (3.13)$$

$$r_k = 0,016 + \frac{1,359^2 \cdot 4,9^2 \cdot 0,016}{0,016^2 + 1,359^2 \cdot (4,9 + 0,188)^2} = 0,031 \text{ Ом.}$$

Реактивний загальний опір для загальмованого двигуна $x_{ке}$ знаходимо за формулою:

$$x_k = \alpha \cdot x_{1H} + \alpha \cdot x_{OH} \cdot \frac{(r'_2)^2 + x'_{2H} \cdot (x'_{2H} + x_{OH}) \cdot \alpha^2}{(r'_2)^2 + (x'_{2H} + x_{OH})^2 \cdot \alpha^2}, \quad (3.14)$$

$$x_k = 1,359 \cdot 0,11 + 1,359 \cdot 4,9 \cdot \frac{0,016^2 + 0,188 \cdot (0,188 + 4,9) \cdot 1,359^2}{0,016^2 + (0,188 + 4,9) \cdot 1,359^2} = 0,396 \text{ Ом.}$$

Еквівалентний опір для загальмованого двигуна знаходимо за формулою:

$$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2}, \quad (3.15)$$

$$Z_k = \sqrt{0,031^2 + 0,396^2} = 0,397 \text{ Ом.}$$

Амплітудне значення струму першої гармоніки розраховуємо за формулою:

$$I_{1ak} = \frac{U_{1a}}{z_k}, \quad (3.16)$$

$$I_{1ak} = \frac{954,93}{0,397} = 2406,33 \text{ А.}$$

Кут зміщення розраховуємо за формулою:

$$\varphi_k = \operatorname{arctg} \frac{x_k}{r_k}, \quad (3.17)$$

$$\varphi_k = \operatorname{arctg} \frac{0,396}{0,031} = 1,493 \text{ рад} = 85,5 \text{ град.}$$

Струм першої гармоніки в режимі загальмованого двигуна $i_{1k}(\theta)$ розраховуємо за формулою:

$$i_{1k}(\theta) = I_{1a_k} \cdot \sin(\theta - \varphi_k). \quad (3.18)$$

Розрахунки наведемо в табл. 3.1.

На інтервалі кожного напівперіоду крива фазної напруги АІН описується виразом:

$$U(\omega t) = \begin{cases} qU_a \dots n \text{ при } \dots 0 \leq \omega t \leq \gamma, \\ U_a \dots n \text{ при } \dots \gamma \leq \omega t \leq (\pi - \gamma), \\ qU_a \dots n \text{ при } \dots (\pi - \gamma) \leq \omega t \leq \pi. \end{cases} \quad (3.19)$$

Напишемо рівняння електричної рівноваги по інтервалах фазної напруги для фази АД, подавши її еквівалентним статичним навантаженням:

$$\begin{cases} qU_a = R \cdot r_k + L di_1 / dt, \dots de \dots 0 \leq t \leq \gamma / \omega, \\ U_a = R \cdot r_k + L di_2 / dt, \dots de \dots \gamma / \omega \leq t \leq (\pi - \gamma) / \omega, \\ qU_a = R \cdot r_k + L di_3 / dt, \dots de \dots (\pi - \gamma) / \omega \leq t \leq \pi / \omega. \end{cases} \quad (3.20)$$

З умови безперервності фазного струму на границях інтервалів у сталому режимі маємо:

$$\begin{cases} i_{1k} = i_{2H}, \\ i_{2k} = i_{3H}, \\ i_{3k} = -i_{1H}. \end{cases} \quad (3.21)$$

Вираз (3.20) являє собою початкові умови, що дозволяють визначити єдине розв'язання системи (3.21.):

$$\begin{cases} i_1(\theta) = \frac{qUa}{r_k} \left(1 - e^{-\theta/\omega\tau}\right) + i_{1H} e^{-\theta/\omega\tau}, \text{ при } 0 \leq \theta \leq \gamma, \\ i_2(\theta) = \frac{Ua}{r_k} \left(1 - e^{-\theta/\omega\tau}\right) + i_{2H} e^{-\theta/\omega\tau}, \text{ при } 0 \leq \theta \leq \pi - 2\gamma, \\ i_3(\theta) = \frac{qUa}{r_k} \left(1 - e^{-\theta/\omega\tau}\right) + i_{3H} e^{-\theta/\omega\tau}, \text{ при } 0 \leq \theta \leq \gamma, \end{cases} \quad (3.22)$$

Уведемо такі позначення :

$$I = \frac{Ua}{r_k}, \quad a = e^{-\gamma/\omega\tau}, \quad b = e^{-(\pi - 2\gamma)/\omega\tau}. \quad (3.23)$$

$$\omega\tau = \frac{x_k}{r_k} \quad (3.24)$$

$$\omega\tau = \frac{0.396}{0.031} = 12.829,$$

$$a = e^{-(\pi/3)/12.829} = 0.922,$$

$$b = e^{-(\pi - 2 \cdot (\pi/3))/12.829} = 0.922.$$

Підставляючи прийняті позначення і розв'язуючи цю систему з урахуванням граничних умов, дістанемо:

$$\begin{cases} i_{1H} = -I \frac{q \cdot (1-a)(1+ba) + a \cdot (1-b)}{1+a^2b}, \\ i_{2H} = I \frac{q \cdot (1-a)^2 - a^2 \cdot (1-b)}{1+a^2b}, \\ i_{3H} = I \frac{qb \cdot (1-a)^2 + (1-b)}{1+a^2b}. \end{cases} \quad (3.25)$$

Підставляючи отримані значення для початкових умов у систему (3.22), одержимо вирази, що описують фазні струми АД на інтервалах для узагальненої кривої фазної напруги АІН:

$$\begin{aligned}
i_1(\theta) &= I \left\{ q - \frac{q \cdot (2 - a + ab) + a \cdot (1 - b)}{1 + a^2 b} \cdot e^{-\theta / \omega \tau} \right\} \text{ при } 0 \leq \theta \leq \gamma, \\
i_2(\theta) &= I \left\{ 1 - \frac{(1 + a^2) - q \cdot (1 - a)^2}{1 + a^2 b} \cdot e^{-\theta / \omega \tau} \right\} \text{ при } 0 \leq \theta \leq (\pi - 2\gamma), \\
i_3(\theta) &= I \left\{ q - \frac{q \cdot (1 - b + 2ab) - (1 - b)}{1 + a^2 b} \cdot e^{-\theta / \omega \tau} \right\} \text{ при } 0 \leq \theta \leq \gamma,
\end{aligned} \quad (3.26)$$

З уведенням кутової θ_n й амплітудної A_n і B_n комутувальних функцій загальний розв'язок для фазних струмів на інтервалі зміни поточного електричного кута θ у межах від 0 до π можна подати у вигляді одного рівняння:

$$i_k(\theta) = \frac{U_a}{r_k} \left[A_n - B_n e^{-(\theta - \theta_n) / \omega \tau} \right] \quad (3.27)$$

Значення кутової й амплітудної комутувальних функцій за інтервалом безперервності живлячої напруги наводимо в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Значення кутової й амплітудних комутувальних функцій

Параметр		Значення параметра		
Номер інтервалу	n	1	2	3
Діапазон зміни поточного ефективного кута	θ	$0 \div \gamma$	$\gamma \div (\pi - \gamma)$	$(\pi - \gamma) \div \pi$
Кутова комутувальна функція	θ_n	0	γ	$(\pi - 2 \cdot \gamma)$
Амплітудна комутувальна функція	A_n	0	1	0
	B_n	B_1	B_2	B_3

B_n розраховуємо за формулою:

$$\begin{aligned}
B_1 &= \frac{q(2 - a + ab) + a(1 - b)}{1 + a^2 b}, \\
B_1 &= \frac{0,5 \cdot (2 - 0,922 + 0,922 \cdot 0,922) + 0,922(1 - 0,922)}{1 + (0,922)^2 \cdot 0,922} = 0,58,
\end{aligned} \quad (3.28)$$

$$B_2 = \frac{(1+a^2) - q(1-a)^2}{1+a^2b}, \quad (3.29)$$

$$B_2 = \frac{(1+(0,922^2)) - 0,5 \cdot (1-0,922)^2}{1+(0,922)^2 \cdot 0,922} = 1,0356,$$

$$B_3 = \frac{q(1-b+2ab) - (1-b)}{1+a^2b}, \quad (3.30)$$

$$B_3 = \frac{0,5 \cdot (1-0,922+2 \cdot 0,922 \cdot 0,922) - (1-0,922)}{1+(0,922)^2 \cdot 0,922} = 0,454 \cdot$$

Індуктивність загальмованого двигуна знаходимо за формулою:

$$L_K = \frac{x_K}{2\pi f_1}, \quad (3.31)$$

$$L_K = \frac{0,396}{2 \cdot \pi \cdot 70} = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Часова складова загальмованого двигуна знаходимо за формулою:

$$\tau_K = \frac{L_K}{r_K}. \quad (3.32)$$

Результати розрахунку реакції схеми заміщення загальмованого АД на прикладену східчасту напругу $i_k(\theta)$ наводимо в табл. 3.1.

Синусоїдальна складова фазного струму АД визначається першою гармонікою прикладеної напруги:

$$U_1(\theta) = \frac{4U_a}{\pi} [q + (1-q)\cos\gamma] \sin\theta, \quad (3.33)$$

Результати розрахунку $U_1(\theta)$ наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Розрахунок синусоїдної складової фазного струму $U_1(\theta)$,

$$U(\theta) \text{ та } \sum_{v=1}^{\infty} U_v(\theta)$$

θ , град	U, В	U_1 , В	$\sum_{v=1}^{\infty} U_v(\theta)$
0	500	0	500
10	500	165,747	334,253
20	500	326,458	173,542
30	500	477,249	22,751
40	500	613,540	-113,540
50	500	731,188	-231,188
60	500	826,620	-326,620
60	1000	826,620	173,380
70	1000	896,935	103,065
80	1000	939,998	60,002
90	1000	954,499	45,501
100	1000	939,998	60,002
110	1000	896,936	103,064
120	1000	826,621	173,379
120	500	826,621	-326,621
130	500	731,190	-231,190
140	500	613,542	-113,542
150	500	477,251	22,749
160	500	326,460	173,540
170	500	165,749	334,251
180	500	0,003	499,997

Будуємо залежності фазного струму $i_\phi(\theta)$ та його першої гармоніки $i_1(\theta)$, живильної напруги $U(\theta)$ та її першої гармоніки $U_1(\theta)$.

Також будемо різницю між прикладеною напругою $U(\theta)$ та її першою

гармонікою $U_1(\theta)$, тобто напругою на двигуні $\sum_{v=1}^{\infty} U_v(\theta)$.

Будемо різницю між струмом загальмованого двигуна $i_k(\theta)$ та першою гармонікою $i_{1k}(\theta)$.

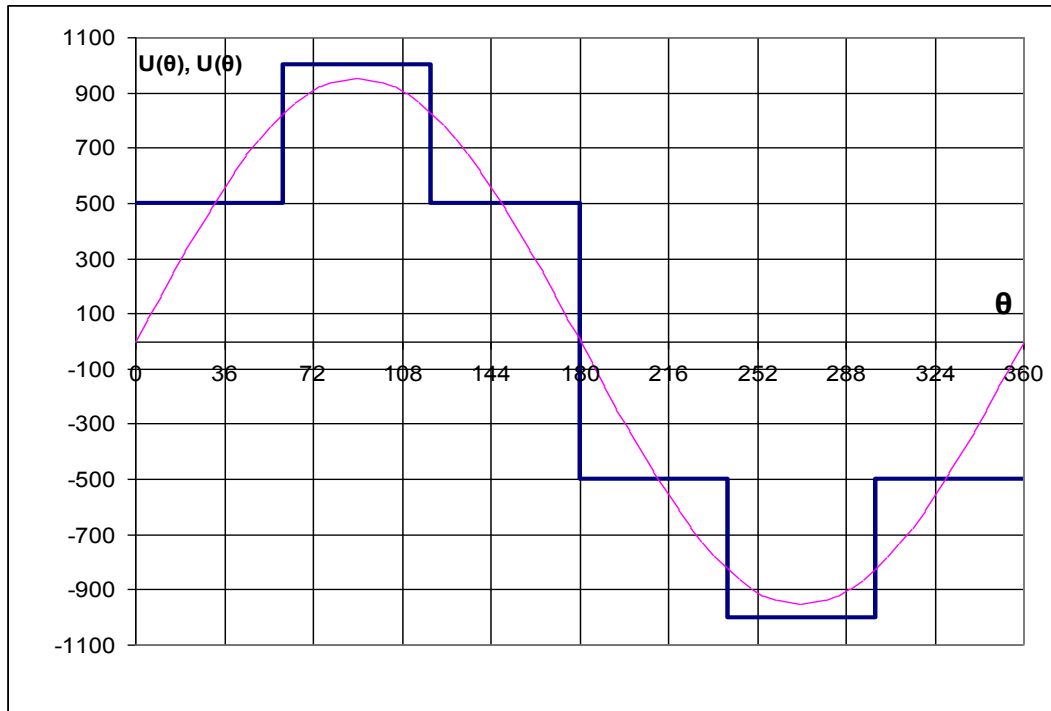


Рисунок 3.3 – Прикладена напруга $U(\theta)$ та її перша гармоніка $U_1(\theta)$

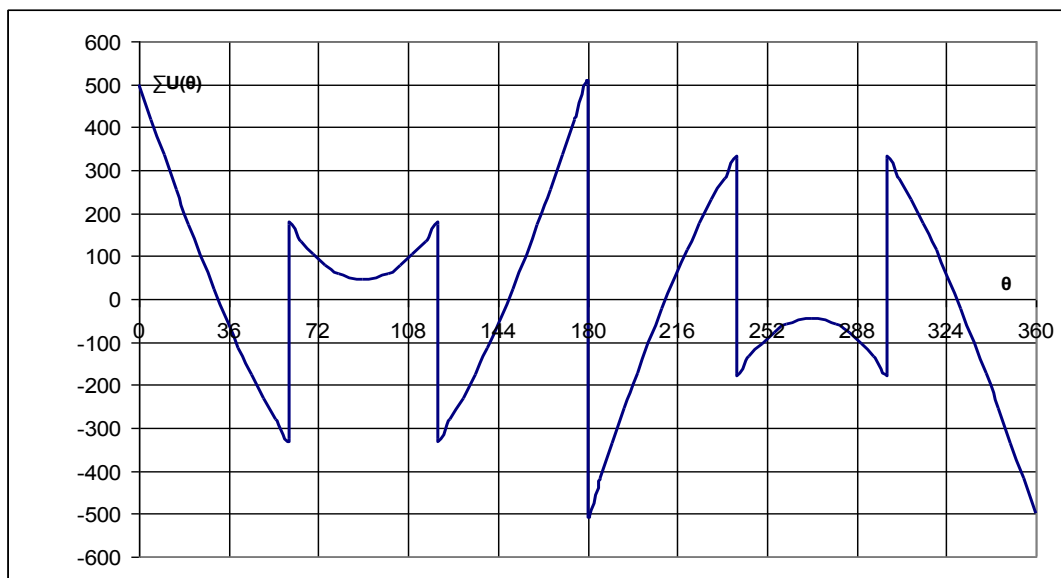


Рисунок 3.4 – Напруга вищих гармонік $\sum_{v=1}^{\infty} U_v(\theta)$

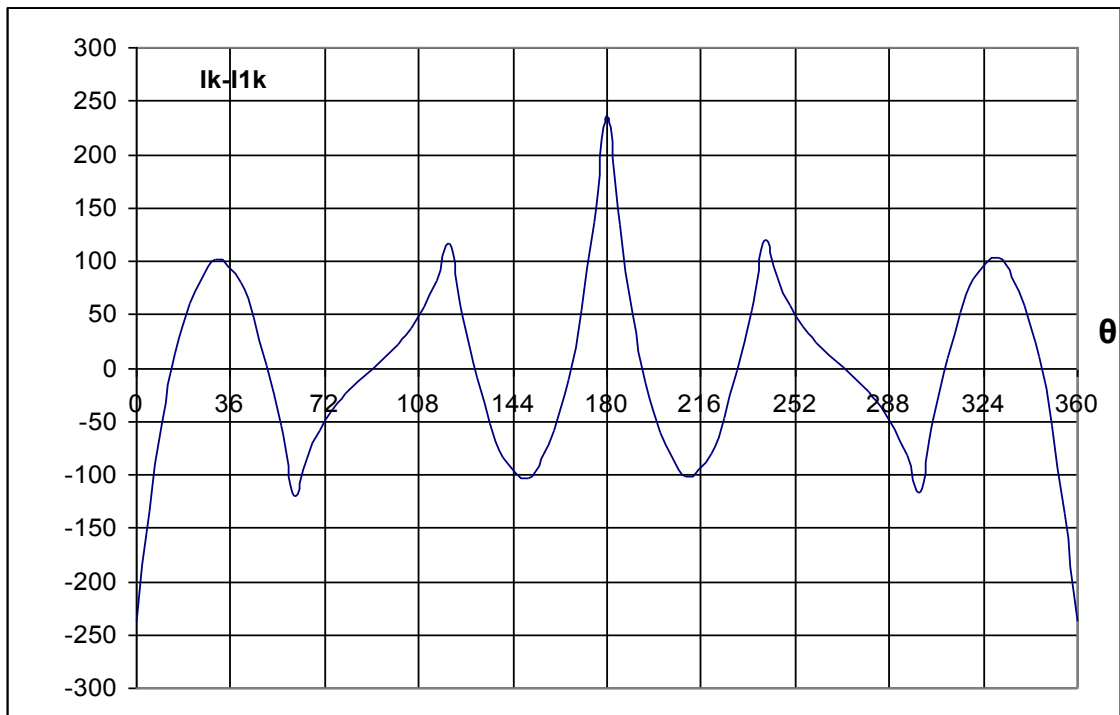


Рисунок 3.5 – Різниця струмів $i_k(\theta) - i_{1k}(\theta)$

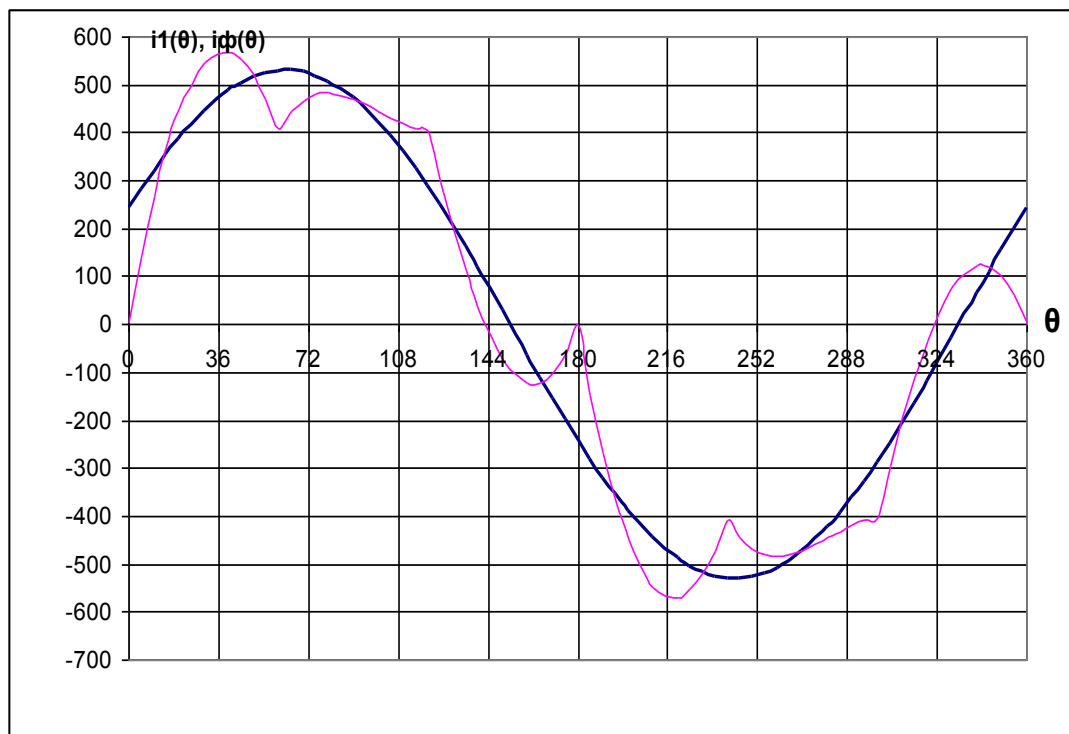


Рисунок 3.6 – Фазний струм $i_\phi(\theta)$ та його перша гармоніка $i_1(\theta)$

Завдання до теми

Згідно з варіантом завдання (додаток Б, табл. Б.1) для прототипу електропривода локомотива:

1) за прикладом виконати розрахунок потужності фазних струмів двофазної системи «автономний інвертор напруги–асинхронний електродвигун»;

2) за отриманими розрахунковими значеннями побудувати графічні залежності:

- напруги $U(\theta)$ та її першої гармоніки $U_1(\theta)$;
- напруги вищих гармонік;
- різниці струмів $i_k(\theta) - i_{1k}(\theta)$;
- фазного струму $i_\phi(\theta)$ та його першої гармоніки $i_1(\theta)$.

Контрольні питання

1. Наведіть вимоги до силових ланцюгів тягового електропривода.
2. Методи поліпшення режимів роботи асинхронного тягового електропривода.
3. Поясніть особливості конструкції трифазного електродвигуна з метою зниження впливу високих гармонік струму.
4. Наведіть схеми автономного інвертора напруги і вкажіть переваги та їх недоліки.
5. Поясніть значення «оптимальна форма кривої фазної напруги».

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ

Під час оцінювання роботи студентів на практичних роботах беруть до уваги якість оформлення звіту з практичних робіт, якість відповідей на питання звіту, правильність і повноту відповідей на питання, поставлені викладачем у процесі захисту практичних робіт.

Бали за виконання практичних робіт загалом можуть бути одержані лише за умови, що виконано всі передбачені завдання практичних робіт і складено звіти.

Кількість балів визначається змістовністю наведених пояснень, чіткістю формулювань, якістю викладання матеріалу та його оформлення. При цьому враховуються правильність оформлення звіту, володіння державною мовою, відповідність розрахункового матеріалу та іншого оформлення чинним стандартам. Розподіл балів за практичні роботи з навчальної дисципліни «Електропривод з автономними джерелами живлення» наведено нижче.

Критерії оцінювання роботи студентів на практичних заняттях:

- відвідування практичного заняття – 2 бали за заняття;
- підготовка до практичного заняття – 1 бал за семестр;
- виконання практичних робіт – 2 бали за семестр;
- підготовка звітів щодо виконання практичних робіт – 2 бали за семестр;
- захист практичних робіт – 10 балів за роботу;
- своєчасність захисту практичних робіт – 2 бали за семестр;
- активність студента на практичних заняттях – 1 бал за семестр.

Для студентів заочної форми навчання вводиться коефіцієнт 0,5 для усіх критеріїв оцінювання окрім захисту практичних робіт.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи: учебн. для ВУЗов ж.-д. трансп. М.: Транспорт, 1999. 464 с.
2. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу: навч. посіб. за ред. Ю. П. Гончарова. Харків: НТУ «ХПИ», 2004. 184 с.
3. Ротанов Н. А., Курбасов А. С., Быков Ю. Г., Литовченко В. В. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями. М.: Транспорт, 1991. 336 с.
4. Гусевський Ю. І., Пасько О. В., Шаповал В. П. Розрахунок фазних струмів двофазної системи «Автономний інвертор напруги – Асинхронний двигун». збірник наукових праць, УкрДАЗТ, №44, 2000. 59 с.
5. Основы электрического транспорта. Слепцова М. А., Долаберидзе Г. П., Прокопович А. В. и др. Москва: Издательский центр «Академия», 2006. 464 с.
6. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода. Москва: Энергоиздат, 1981. 576 с.
7. Грищенко А. В., Стрекопытов В. В. Электрические машины и преобразователи подвижного состава. Москва: Издательский центр «Академия», 2005. 320 с.
8. Осипов С. И., Осипов С. С. Основы тяги поездов: учебник для студентов техникумов колледжей ж/д тр-та. Москва: УМК МПС России, 2000. 592 с.
9. Калинин В. К. Электровозы и электропоезда. Москва: Транспорт, 1991. 480 с.
10. Вольдек А. И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 840 с.
11. Байрыева Л. С., Шевченко В. В. Электрическая тяга: городской наземный транспорт. Москва: Транспорт, 1986. 206 с.

Таблиця А.1 – Електродвигуни АІР–основні технічні характеристики

№ пор.	Електродвигун	Потужність, кВт	Об/хв	Струм при 380 В, А	ККД, %	Коеф. потуж.	Іп/Ін	Маса, кг
1.	АІР 90 L2	3	3000	6,5	84,5	0,85	7,0	19,0
2.	АІР 90 L4	2,2	1500	5,3	80	0,79	6,0	18,1
3.	АІР 90 L6	1,5	1000	4,2	76	0,70	5,0	19,0
4.	АІР 90 LB8	1,1	750	3,3	74	0,72	4,5	20,5
5.	АІР 100 L2	5,5	3000	11,0	88	0,88	7,5	31,5
6.	АІР 100 L4	4	1500	9,3	85	0,84	7,0	29,2
7.	АІР 100 L6	2,2	1000	5,9	81,5	0,74	6,0	27,0
8.	АІР 100 L8	1,5	750	4,5	76,5	0,70	3,7	24,0
9.	АІР 112 M2	7,5	3000	14,7	87,5	0,88	7,5	49
10.	АІР 112 M4	5,5	1500	11,3	85,5	0,86	7	49
11.	АІР 112 MB6	4	1000	9,1	82	0,81	6	48
12.	АІР 112 MB8	3	750	7,8	79	0,74	6	49
13.	АІР 132 M2	11	3000	21,1	88	0,9	7,5	78
14.	АІР 132 M4	11	1500	22,2	88,5	0,85	7,5	84
15.	АІР 132 M6	7,5	1000	16,5	85,5	0,81	7	82
16.	АІР 132 M8	5,5	750	13,6	83	0,74	6	82
17.	АІР 160 S2	15	3000	30	88	0,86	7,5	109
18.	АІР 160 M2	18,5	3000	35	90	0,88	7,5	124
19.	АІР 160 S4	15	1500	29	89	0,87	7	121
20.	АІР 160 M6	15	1000	31	89	0,82	7	136
21.	АІР 160 M8	11	750	26	87	0,68	6	152
22.	АІР 180 S2	22	3000	41,5	90,5	0,89	7	160

Таблиця Б.1 – Вихідні параметри трифазного тягового електродвигуна

7FMTK132S4, 7FMTKH132S4 ()															
R1	R2	X1	X2	Un	Pn	КПД	cosφ	fn	пн	Mн	In	Io	Km	Xm	2p
1,593	1,247	2,22	3	360	3,95	80,7	0,73	47	667	56,5	10,7	6,7	2,3	33,5	8
1,351	0,822	1,758	1,716	360	5,35	83,5	0,84	47	897	57	12,2	5,9	2,4	40,32	6
0,853	0,573	1,147	1,183	360	7,2	85,1	0,83	47	901	76,3	16,3	8,5	2,7	27,74	6
0,687	0,505	1,585	1,59	360	7,5	87,2	0,87	47	1356	52,8	15,8	5,8	3	40,57	4
0,431	0,381	0,91	1,11	357	10,1	88,5	0,87	47	1357	71,1	21,1	8	3,4	28,69	4
0,257	0,023	0,7	1,5	360	14,65	88,35	0,8	47	1366	102,4	33	14,3	2,7	12,29	4
0,198	0,121	0,458	0,6	360	21	90,12	0,87	47	1376	145,7	42,7	16,1	2,6	15,16	4
0,098	0,077	0,261	0,428	360	33	91,89	0,87	47	1377	229	66	23,5	2,7	9,86	4
0,68	0,054	0,195	0,343	357	41	92,6	0,85	47	1382	283	84	33	2,8	9,86	4
0,054	0,037	0,178	0,303	360	49,5	93,14	0,87	47	1386	341	97	31	2,5	6,75	4

Визначення та одиниці вимірювання: R1, R2, X1, X2, Xm – параметри T-подібної схеми заміщення асинхронного електродвигуна, Ом, розраховані для однієї фази; Un – номінальна напруга двигуна, В; fn – номінальна частота напруги живлення, Гц; Pn – номінальна потужність двигуна, кВт; КПД – коефіцієнт корисної дії в номінальному режимі, %; cosφ – номінальний коефіцієнт потужності, в. о.; пн – номінальна частота обертання двигуна, об/хв; In – номінальний струм статора, А; Mн – номінальний момент двигуна, Нм; Km – кратність максимального моменту, в. о.; Io – струм холостого ходу, А.

Методичні вказівки щодо виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Електропривод з автономними джерелами живлення» для студентів денної та заочної форм навчання зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Укладачі: к. т. н., старш. викл. О. А. Хребтова

Відповідальний за випуск Д. Й. Родькін

Підп. до др. _____. Формат 60×84 1/16 Папір тип. Друк ризографія.

Ум. друк. арк. _____. Наклад _____ прим. Зам № _____. Безкоштовно.

Редакційно-видавничий відділ
Кременчуцького національного університету
імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600