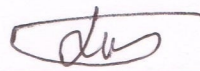


Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри


(підпис)

І. С. Білюк

«20» 12 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня магістра

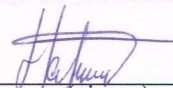
зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва спеціальності)

освітня програма Електромеханічні системи автоматизації та електропривод
(назва освітньої програми)

на тему: Імітатор вітроенергетичної установки

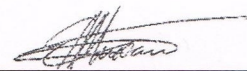
Виконав: студент групи 6371м

Надолішний Олександр Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)


(підпис)

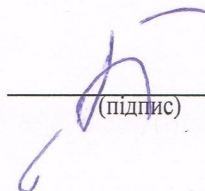
Керівник доц. каф. автоматики, к.т.н.,
доц. Надточій А.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)


(підпис)

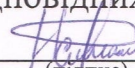
Рецензент доцент кафедри СЕЕС,
к.т.н., доцент Ставинський Р.А.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)


(підпис)

Засвідчую, що у цій кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент


(підпис)

м. Миколаїв – 2024 року

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 95с., 6 розд, 35 рис., 1 дод., 14 джерел.

Ключові слова: імітатор, вітрогенератор, енергія вітру, система керування, механічні характеристики, випрямляч, реактор, показники якості керування.

Об'єкт дослідження – процеси, які протікають в вітротурбіні, що реалізовані в імітаторі.

Мета роботи – На основі існуючих теоретичних досліджень провести синтез імітатора вітрової турбіни для дослідження вітроенергетичної установки.

Перший розділ присвячений аналізу схем перетворення енергії вітру за допомогою вітроенергетичних установок і згідно цього зроблена постановка задачі дослідження. У другому розділі наведена методологія магістерського дослідження. У третьому розділі здійснено розробка системи керування електроприводом імітатора вітроенергетичної установки. У четвертому розділі наведено моделювання імітатора вітрогенераторної установки.

У п'ятому та шостому розділах розглянути питання з охорони праці та довкілля.

Додатки містять слайди мультимедійної презентації.

ABSTRACT

Qualification work: 95 p., 6 chapters, 35 figures, 1 appendix, 14 sources.

Keywords: simulator, wind generator, wind energy, control system, mechanical characteristics, rectifier, reactor, control quality indicators.

The object of study is the processes occurring in a wind turbine, which are implemented in a simulator.

Purpose - On the basis of existing theoretical studies, to synthesise a wind turbine simulator for the study of a wind power plant.

The first section is devoted to the analysis of wind energy conversion schemes using wind power plants and, accordingly, the research problem is formulated. The second section describes the methodology of the master's research. The third section describes the development of the control system for the electric drive of a wind turbine simulator. The fourth section describes the modelling of the wind turbine simulator.

The fifth and sixth chapters deal with occupational health and safety and environmental issues.

The appendices contain slides of a multimedia presentation.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1	
ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕУ.....	9
1.1 Характеристики вітрового потоку.....	9
1.2 Виробництво електроенергії за допомогою вітроенергетичних установок.....	12
1.3 Класифікація ВЕУ.....	16
1.3.1 Класифікація по співвідношенню потужності ВЕУ й потужності енергосистеми.....	16
1.3.2 Класифікація за типом застосовуваної вітротурбіни.....	17
1.3.3 Класифікація за типом застосовуваної електромашини.....	21
1.4 Механічні характеристики вітротурбін.....	21
1.5 Імітація поведінки реальних вітротурбін.....	24
РОЗДІЛ 2	
МЕТОДОЛОГІЯ МАГІСТЕРСЬКОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	
2.1 Побудова структурно-логічної схеми магістерського дослідження.....	27
2.2 Методи проведення дослідження.....	29
2.3 Методи розрахунку поставленої задачі.....	32
2.4 Висновки по розділу 2.....	34
РОЗДІЛ 3	
ЕЛЕКТРОПРИВОД ІМІТАТОРА ВЕУ.....	35
3.1 Структура електропривода.....	35
3.2 Електромеханічна система імітатора ВТ на базі електропривода постійного струму.....	39

3.3 Електромагнітні процеси в СНП електропривода імітатора вітротурбіні.....	41
3.4 Вибір схеми випрямляча (етап структурного синтезу).....	45
3.5 Розрахунок параметрів елементів схеми керованого випрямляча (етап параметричного синтезу).....	47
3.6 Перевірка вентилів по тепловому режиму.....	50
3.7 Обмеження комутаційних перенапруг.....	52
3.8 Розрахунок індуктивності реактора, що згладжує.....	53
3.9 Конструктивний розрахунок реактора, що згладжує.....	56

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ СНП ІМІТАТОРА ВТ.....	60
4.1 Побудова сімейства зовнішніх характеристик СНП.....	60
4.2 Побудова оптимізованої моделі СНП із вибором оптимальної індуктивності реактора.....	67
4.3 Планування експерименту.....	73
4.4 Опис експериментального стенда.....	74

РОЗДІЛ 5

ЕЛЕКТРОБЕЗПЕЧНІСТЬ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ.....	78
5.1 Розрахунок заземлення.....	78
5.2 Розрахунок автоматичного захисного відключення	82

РОЗДІЛ 6

ПРАВИЛА ЗАПОБІГАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ШКІДЛИВИМИ РІДКИМИ РЕЧОВИНАМИ, ЩО ПЕРЕВОЗЯТЬСЯ НАЛИВОМ	84
6.1 Правило 7 приймальні споруди і пристрої для вивантаження вантажу біля причалів	84
6.2 Правило 8 заходи контролю.....	85
ВИСНОВКИ.....	94
ЛІТЕРАТУРА.....	95

ВСТУП

Актуальність проблеми. Для власників вітрильних яхт вітрогенератор - це природний і зрозумілий спосіб збільшення електричної потужності. Він використовує ту саму енергію, що рухає вітрильне судно, а технологія, що лежить в основі його роботи, надійна і добре вивчена. Тому незважаючи на зростаючу популярність гідроенергетиків і появу усе більш ефективних сонячних панелей, автономні вітрогенератори як і раніше широко поширені на яхтах. Для зарядки тягових акумуляторів від берегової електричної мережі на яхті встановлюють комбінований інвертор або зарядний пристрій. У міжсезонні з цим завданням справляється невелика сонячна панель. Вітряну турбіну має сенс використати, коли потрібно додаткове потужне джерело зарядки, яке працюватиме на яхті спільно з сонячними батареями або гідроенергетиком. Яхтові вітрогенератори - це невеликі облаштування відносно малої потужності. Проте енергії, що виробляється ними, вистачає, щоб на протязі доби зарядити акумуляторну батарею 12-вольт місткістю 800 ампер-годин. Плюс вітрогенератора в тому, що він робить електричну енергію практично постійно - під час руху і на якірній стоянці, в сонячні і в похмурі дні. Вітрогенератор не вимагає технічного обслуговування, ремонту і додаткового устаткування для запуску.

У майбутньому неминуче скорочення споживання органічного палива і його заміна іншими джерелами енергії. Використання поновлювальних джерел енергії (ПДЕ) найбільше привабливо, тому що воно не порушує природного балансу енергії, одержуваною нашою планетою. До ПДЕ ставляться: сонячна радіація, енергія вітру, енергія рік, припливів і океанських хвиль, енергія, укладена в біомасі й органічних відходах. Для України перспективним є використання вітроенергетичних ресурсів. Енергія вітру протягом тривалого часу розглядається в якості екологічно чистого невичерпного джерела енергії. Перш ніж енергія вітру зможе принести значну користь, повинні бути вирішені багато проблем, головні з яких: висока вартість вітроенергетичних установок, їхня здатність надійно працювати в автоматичному режимі протягом багатьох років і забезпечувати безперебійне електропостачання. Тому, сьогодні найбільш важливим завданням перед вітроенергетикою є зниження

питомої вартості електроустаткування ВЕУ. Одним зі шляхів зниження вартості є застосування більше економічних структур електроустаткування ВЕУ. Однак, перед розроблювачами електрообладнання виникає ряд специфічних труднощів, пов'язаних з наявністю в складі ВЕУ вітротурбіни (ВТ). Випробування нових систем необхідно проводити в польових умовах. Крім того, стохастичний характер вітрового потоку (ВП) робить скрутним випробування ВЕУ у всіх можливих режимах. Одним зі шляхів подолання виниклих проблем, є застосування імітатора ВТ, тобто електромеханічної системи здатної імітувати механічні характеристики реальної ВТ при різних заданих швидкостях ВП. Такий підхід є економічно вигідним, оскільки дозволить робити випробування нових видів електроустаткування ВЕУ в лабораторних умовах без виїзду на полігон.

Мета і завдання дослідження. На основі існуючих теоретичних досліджень провести синтез імітатора ВТ для дослідження вітроенергетичної установки.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Скласти математичну модель імітатора ВТ на основі електропривода постійного струму.
2. Провести теоретичні дослідження, щодо поведінки електропривода з реальними параметрами вітру та перевірити адекватність імітатора.
3. Довести доцільність використання імітатора ВТ.

Об'єкт дослідження — процеси, які протікають в вітротурбіні, що реалізовані в імітаторі.

Предмет дослідження — показники якості, що забезпечують швидкодію та плавність протікання перехідних процесів.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Виявлені закономірності зміни характеристик електроприводу, які не відрізняються від реальних характеристик вітротурбіни.
2. Подальший розвиток отримав алгоритм налаштування імітатора ВТ.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Імітатор вітротурбіни.
2. Методика налаштування вітротурбіни на режим випробувань на імітаторі.

Випробувана методологія і схеми моделювання дозволяють покращити показники якості електропривода.

Апробація результатів роботи. Основні результати магістерської роботи доповідалися та обговорювалися на XV Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», у доповіді «Модернізація електропривода промислового робота» (м. Миколаїв, 2024 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано наукову тезу у збірнику матеріалів XV Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», «Модернізація електропривода промислового робота» – Миколаїв : НУК, 2024. –С.512–515. (26-27 вересня 2024 рік).

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, 6 розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. Робота викладена на 95 сторінках і містить 35 рисунків.

РОЗДІЛ 1

ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕУ

1.1 Характеристики вітрового потоку

Властивості вітру. Вітер - це спрямоване переміщення повітряних мас. Вітрову енергію можна розглядати як одну з форм прояву сонячної енергії, тому що Сонце є тим першоджерелом, що впливає на погодні явища на Землі. Вітер виникає через нерівномірне нагрівання Сонцем поверхні Землі.

Вітер міняється із часом. У більшості регіонів спостерігаються значні сезонні зміни вітрових потоків. Причому в зимові місяці швидкість вітру звичайно вище, ніж улітку. Денні зміни швидкості вітри спостерігаються, як правило, поблизу морів і більших озер. Ранком сонце нагріває землю швидше, ніж воду, тому вітер дме в напрямку узбережжя. Увечері ж земля остигає швидше, ніж вода, тому вітер дме від узбережжя.

Швидкість вітру залежить від висоти над рівнем землі. Близько до землі вітер уповільнюється за рахунок тертя об земну поверхню. Таким чином, вітри бувають сильніше на більших висотах стосовно землі. Для сільськогосподарських полів і пустельних територій при збільшенні висоти над поверхнею землі у два рази спостерігається збільшення швидкості вітру приблизно на 12%. На швидкість вітру значно впливають географічні умови й характер земної поверхні, включаючи різні природні й штучні перешкоди, такі, як пагорби та ін., а також дерева й будинки. Із цієї причини ВЕУ розташовують, по можливості, на піднесені й вилучені від високих дерев, житлових будинків і інших споруджень місцях, тому що такі перешкоди знижують швидкість вітру й приводять до завихрень потоку, що утрудняє перетворення енергії вітру.

Середньорічна швидкість вітру V_C характеризує вітровий потенціал території. Це швидкість вітру, що визначається як середнє арифметичне значення всіх спостережуваних швидкостей вітру протягом року. Середні швидкості вітру можуть

бути обчислені й для інших періодів, наприклад: місячні, денні, вартові.

Енергія, укладена у вітрі, перебуває в кубічній залежності від величини швидкості вітру. Подвоєння швидкості вітру дає збільшення енергії в 8 разів. Таким чином, середня швидкість вітру 5 м/с може дати приблизно в 2 рази більше енергії, чим вітер із середньою швидкістю 4 м/с.

Характеристики вітру вимірюються на метеостанціях. На основі даних багаторічних спостережень швидкостей вітри складаються спеціалізовані карти вітрів. [1]

Енергія вітру. Головною особливістю вітрової енергії є нерівномірність її прояву в часі й просторі. Є регіони, де середня за рік швидкість вітру на висоті 10 м від рівня землі не перевищує 3 м/с. Там не можна розраховувати на ефективну роботу вітроустановок. Однак у країні є багато місць, де можливість економічно вигідного використання енергії вітру не викликає сумнівів, але конкретний вибір ділянок для установки ВЕУ вимагає спеціального обґрунтування й перевірки.

Кінетична енергія E , який володіє повітряний потік, залежить від його маси m і швидкості V може бути визначена по формулі:

$$E = \frac{m \cdot V^2}{2}. \quad (1.1)$$

Якщо у формулу (1.1) підставити значення маси повітря, що протікає через вітротурбіну двигуна, то одержимо вираз для його потужності:

$$P_0 = \frac{\rho \cdot A_0 \cdot V_0^3}{2} \quad (1.2)$$

де ρ - щільність повітряного потоку, що набігає;

A_0 – поверхня що ометається вітротурбіною;

V_0 – швидкість повітряного потоку, що набігає.

До основних факторів, що впливають на точність оцінки енергії вітру, ставляться: зміна щільності повітря залежно від висоти над рівнем моря й

температури й відповідність наявних даних по вітрі вітровим умовам конкретного місця розташування вітродвигуна.

Щільність повітря на рівні моря при нормальних кліматичних умовах, що відповідають нормальному атмосферному тиску 760 мм рт. ст. і температурі +15 °С, дорівнює $\rho = 1,226 \text{ кг/м}^3$. Залежно від висоти над рівнем моря щільність ρ змінюється, знижуючись майже на 10% при висоті 1 км і на 20% при висоті 2,5 км над рівнем моря, що приводить до відповідного зниження потенціалу вітрової енергії. При зниженні температури повітря щільність ρ повітря збільшується, а при підвищенні – знижується. Так, при зниженні температури повітря від нормального рівня (+15°C) на 25 °С (до -10°C), щільність зростає на 10%, а при підвищенні температури на 25 °С (до +40 °С) — щільність повітря знижується приблизно на 7,5%.

Швидкість вітру V_i на висоті H_i , якщо вона відрізняється від висоти, на якій вироблялися виміри, визначається по формулі:

$$V_i = V_{изм} \left(\frac{H_i}{H_{изм}} \right)^m, \quad (1.3)$$

де $m = 0,14$ - статичний коефіцієнт для прибережних зон Західної Європи.

Безперервна реєстрація вимірів швидкості вітру на метеостанціях протягом багатьох років показала, що середньорічні й середньомісячні інші значення швидкості вітру в конкретному місці варіюють у вузькому діапазоні. Незважаючи на те, що вітер - це випадковий процес, йому властиві певні закономірності.

Крім середньої швидкості вітру велике значення має розподіл швидкостей вітру в часі – частота повторюваності окремих значень швидкостей вітру. В останні 20 років широке застосування в усьому світі одержало теоретичний розподіл повторюваності швидкостей по Вейбуллу, що дає непоганий збіг з результатами спостережень. Диференціальна повторюваність швидкостей вітру по градаціях по Вейбуллу Φ_V має наступне вираження:

$$\Phi_v = \frac{\gamma}{\beta} \cdot \left(\frac{V}{\beta}\right)^{\gamma-1} \cdot \exp\left(-\frac{V}{\beta}\right)^{\gamma}, \quad (1.4)$$

де V - градація швидкості вітру;

β - параметр масштабу, чисельно близький до величини середнього значення швидкості вітру;

γ - параметр форми кривій розподілу.

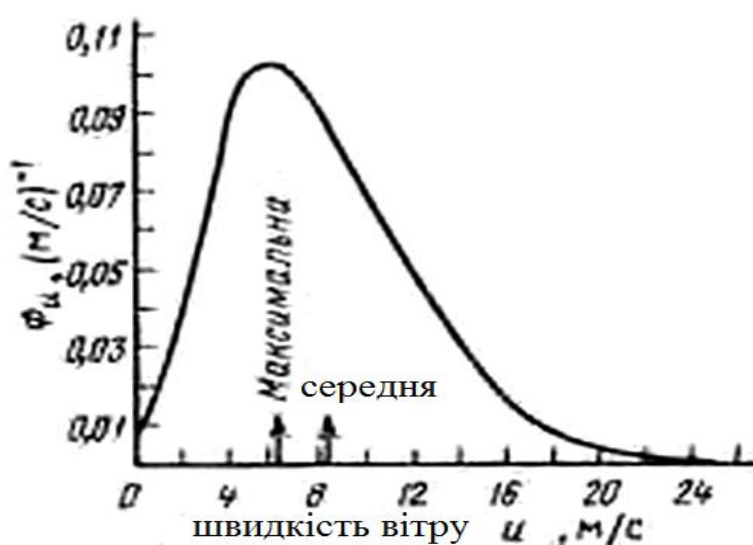


Рисунок 1.1 - Функція розподілу швидкості вітру (розподіл щільності ймовірності)

Щоб одержати значення параметрів β і γ , досить мати експериментальні дані повторюваності швидкостей вітру, бажано за можливо більший період спостережень. Знання параметрів розподілу β і γ істотно підвищує точність розрахунків виробітку енергії ВЕУ в конкретній місцевості.

1.2 Виробництво електроенергії за допомогою вітроенергетичних установок

Використання вітроустановок для виробництва електроенергії є найбільш ефективним способом утилізації енергії вітру. Ефективність перетворення механічної енергії в електричну в електрогенераторі становить звичайно 95%, а втрати

електричної енергії при передачі не перевищують 10%.

З (1.2) видно, що енергія або потужність потоку пропорційна кубу швидкості. Однак у механічну роботу можна перетворити тільки частину енергії потоку, що протікає через вітротурбіну. Інша частина енергії губиться на тертя повітряних часток і різні втрати, тому що вітротурбіна чинить опір руху повітряних часток. Крім того, значна частина енергії втримується в повітряному потоці, що вже пройшов через вітротурбіну. Це пояснюється тим, що потік за вітротурбіною також має деяку швидкість (рис.1.2).

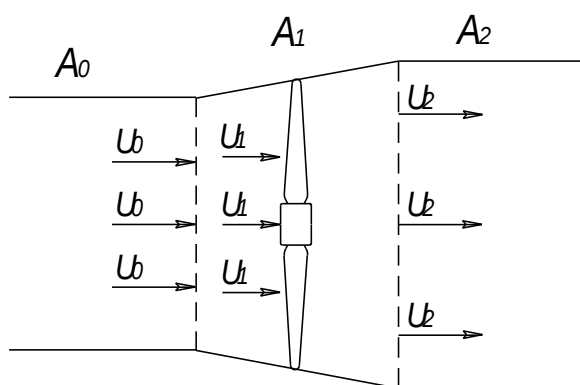


Рисунок 1.2 - Дія сили вітру на вітротурбіну

На рис. 1.2 A_1 – площа, що омітається вітротурбиною, A_0 і A_2 – площі поперечних перерізів минаючих через вітротурбіну вітрового потоку відповідно до й за ними. Причому перетин A_0 розташований за межами збуреної області вітротурбіни, а перетин A_2 – у місці найменшої швидкості потоку. Положення площі перетинів A_0 і A_2 можна визначити за результатами експериментальних вимірів поля швидкостей в околиці вітротурбіни. Безпосередньо в перетині A_1 провести такі виміри неможливо через обертання вітротурбіни.

Швидкість потоку за вітротурбиною не може бути рівний нулю й найкращий режим роботи вітродвигуна має місце, коли швидкість безпосередньо за вітротурбиною становить $2/3$ від первісної швидкості потоку, що набігає на вітротурбіну.

Число, що показує, яка частина потужності повітряного потоку корисно використовується вітротурбиною, називається коефіцієнтом потужності або

коефіцієнтом використання енергії вітру C_p .

Тоді потужність повітряного потоку за вітротурбіною буде дорівнювати:

$$P_1 = \frac{\rho \cdot A_2 \cdot V_2^3 \cdot C_p}{2}. \quad (1.5)$$

У кращих промислових аерогенераторах коефіцієнт потужності досягає 0,4. Коефіцієнт потужності C_p характеризує ефективність використання вітрогенератором енергії повітряного потоку, що проходить через ометаєму вітротурбіною площею A_1 .

Пропоновані при цьому вимоги до частоти й напруги вироблюваної електроенергії залежать від особливостей споживачів цієї енергії. Ці вимоги жорсткі при роботі вітроустановок у рамках єдиної енергосистеми й досить м'які при використанні енергії ВЕУ в освітлювальних і нагрівальних установках. До теперішнього часу розроблено багато проектів вітроелектричних установок, включаючи й генератори до них, але в майбутньому з перетворенням вітроенергетики в самостійну галузь енергетики, безсумнівно, з'являться принципово нові конструкції ВЕУ.

При проектуванні ВЕУ треба враховувати наступні їхні особливості:

- для забезпечення максимальної ефективності роботи вітроколеса варто змінювати частоту його обертання при зміні швидкості вітру, зберігаючи постійним коефіцієнт швидкохідності, у той же час для максимально ефективної роботи електрогенератора необхідна практично постійна частота обертання;
- механічні системи керування частотою обертання вітротурбіни досить складні й дорогі. Набагато ефективніше й дешевше управляти частотою його обертання, змінюючи електричне навантаження електрогенератора;
- оптимальна частота обертання вітротурбіни тим менше, чим більше його радіус, тому тільки дуже малі вітроколеса (радіусом не більше 2 м) вдається з'єднувати з генератором прямо. При більших розмірах вітротурбіни доводиться використовувати підвищувальні редуктори, що роблять вітроустановку і її обслуговування дорогим. Альтернативою редукторам можуть стати нові типи

багатополюсних генераторів, що працюють при менших частотах обертання;

– у конструкції вітроелектричної установки передбачається, як правило, можливість відключення генератора від вітротурбіни й обертання його від хімічного або механічного акумулятора енергії, тому систему керування генератором не зв'язують із роботою вітротурбіни. При відсутності такого зв'язку навіть при “м'якому” з'єднанні генератора з вітротурбіною необхідні спеціальні пристрої, що демпфірують, для того щоб виключити механічні удари, перевантаження й кидки напруг на виході генератора.

Крім того, варто враховувати специфічні вимоги, пропоновані до вихідних параметрів ВЕУ. а саме:

а) найбільш сприятливі вітрові умови існують, як правило, у малонаселених районах, на островах і в морі. Вимоги до електроенергії в таких районах досить специфічні, але майже напевно її тут потрібно набагато менше, ніж у розвинених промислових районах;

б) аналіз парку споживачів електроенергії показує, що лише 5 - 10% з них висувають певні вимоги до її параметрів (наприклад, до частоти). Це в основному електродвигуни, електронні пристрої й освітлювальні установки. Тому доцільно так будувати систему електропостачання, щоб вона могла забезпечувати споживачів як дешевою електроенергією з нестабілізованими параметрами (наприклад, для опалення), так і відносно дорогою, але зі стабільними параметрами;

в) енергосистеми в сільській місцевості звичайно малопотужні й відносно низьковольтні (менш 33 кВ), при передачі енергії на більші відстані виникає багато проблем, пов'язаних з її втратами, тому підключення ВЕУ до таких систем недоцільно;

г) періоди затишності неминучі, тому для виключення перебоїв в електропостачанні ВЕУ повинні мати акумулятори енергії або бути запаралеленими електроенергетичними установками інших типів.

Зовсім очевидно, що розвиток вітроенергетики буде стимулювати прогрес у всій електроенергетиці.

1.3 Класифікація ВЕУ

Сучасні ВЕУ - це комплекс взаємозалежного встаткування й споруджень, які перетворюють енергію вітру в механічну енергію обертової вітротурбіни, а потім в електричну енергію.

Основними класифікаційними ознаками структур ВЕУ є:

- співвідношення потужності ВЕУ й потужності енергосистеми;
- тип застосовуваної вітротурбіни;
- тип застосовуваної електромашини.

1.3.1 Класифікація по співвідношенню потужності ВЕУ й потужності енергосистеми

Відповідно до цієї класифікації ВЕУ діляться на три класи.

Клас А. До цього класу ставляться ВЕУ, непідключені до єдиної енергосистеми. Залежно від застосування, такі ВЕУ звичайно комплектуються невеликими пристроями що акумулюють електроенергію. Частота вихідної напруги, як правило, не стабілізована. Вони застосовуються в основному для висвітлення, електроживлення сигнальних пристроїв і засобів зв'язку. Потужність таких ВЕУ не більше 5 - 10 кВт.

Клас В. Потужність цих ВЕУ порівнянна з потужністю мережі. Як правило, такі ВЕУ входять до складу локальних енергосистем окремих районів, наприклад, островних, відрізаних від основної енергосистеми природними перешкодами: морем, болотистою місцевістю й т.д. Найбільше економічно в цьому випадку комбіноване застосування ВЕУ з дизельелектростанціями. При цьому ВЕУ розглядаються як засіб економії дизельного палива. Параметри вихідної напруги в таких системах досить стабільні. У системах класу В більш ефективно застосування більших пристроїв, що акумулюють, і споруджень, таких як водневі акумулятори й невеликі станції, що гідроакумулюють.

Клас С. Потужність мережі значно перевищує встановлену потужність ВЕУ.

Такі ВЕУ ставляться до системної вітроенергетики. Вони здатні вплинути на стан енергетичного балансу великого регіону або навіть країни. У класі С доцільно застосування ВЕУ із установленою потужністю від 100 кВт до декількох мегаватів. При цьому загострюються проблеми, пов'язані з геометричними розмірами, виникають напружені режими роботи механічних частин.

У цьому класі можливе досягнення найкращих техніко-економічних показників. При випадковому характері швидкості вітрового потоку й споживання електричної енергії необхідне дотримання балансу потужності. У класах А и В для цієї мети необхідні пристрої що акумулюють, або додаткові пристрої, що генерують, а їхня вартість порівнянна з вартістю ВЕУ. У класі С баланс потужності здійснюється за рахунок енергосистеми, що значно економічніше. Таким чином, найменшої питомої вартості ВЕУ можна досягти саме на шляху розвитку системної вітроенергетики.

1.3.2 Класифікація за типом застосовуваної вітротурбіни

У цей час застосовуються дві основні конструкції вітроагрегатів (рис. 1.3): горизонтально-осьові й вертикально-осьові вітродвигуни. Обидва типи ВЕУ мають приблизно рівний ККД, однак найбільше поширення одержали вітроагрегати першого типу. Потужність ВЕУ може бути від сотень ватів до декількох мегаватів.

До складу вітродвигунів обох типів входять наступні основні частини:

- вітроколесо (вітротурбіна, ротор) - перетворює енергію вітрового потоку, що набігає, у механічну енергію обертання осі турбіни. Діаметр вітроколеса коливається від декількох метрів до декількох десятків метрів. Частота обертання становить від 15 до 100 об/хв. Звичайно для з'єднаних з мережею ВЕУ частота обертання вітроколеса постійна. Для автономних систем з випрямлячем і інвертором - звичайно змінна. Вітроколесо містить лопати, які закріплюються в маточині вітроколеса;

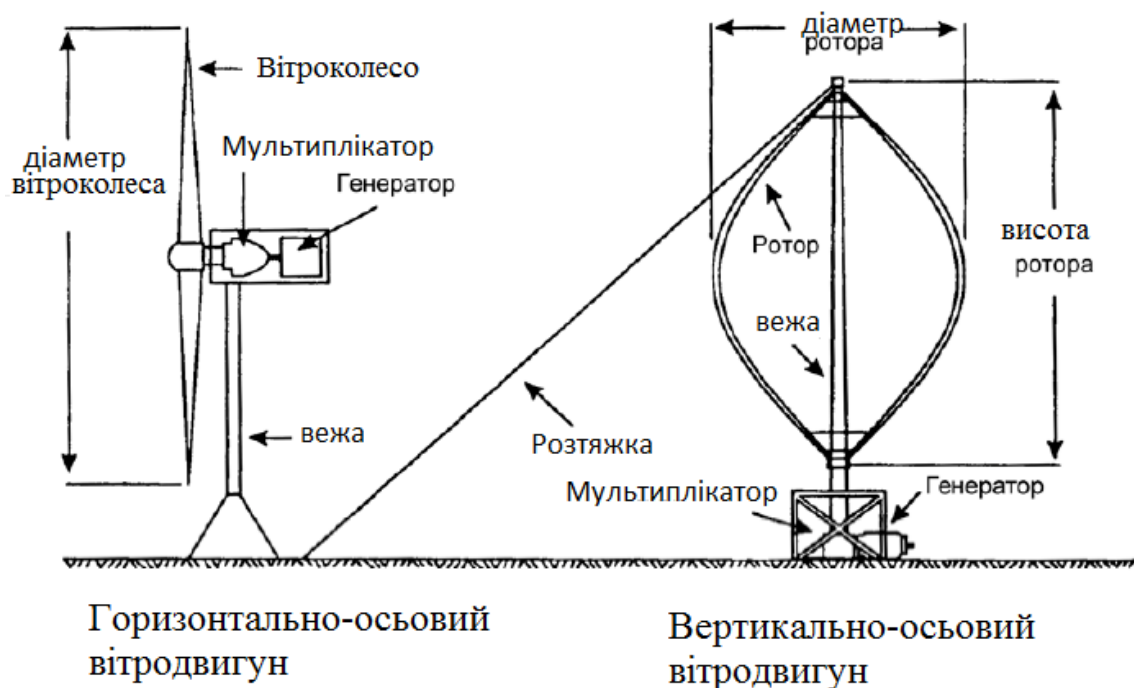


Рисунок 1.3 - Основні види вітродвигунів

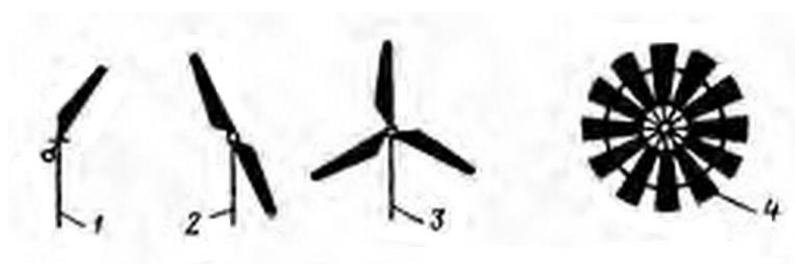
- мультиплікатор (редуктор) - проміжна ланка між вітроколесом і електрогенератором, що підвищує частоту обертання вала вітроколеса й забезпечує узгодження з обертами генератора. Виключення становлять ВЕУ малої потужності зі спеціальними генераторами на постійних магнітах; у таких вітроустановках мультиплікатори звичайно не застосовуються;

- вежа або щогла (її іноді зміцнюють сталевими растяжками) - служить для розміщення головки з вітроколесом і мультиплікатора на вітер на деякій висоті щодо рівня землі, що необхідно для продуктивної роботи вітродвигуна й дотримання вимог техніки безпеки. У ВЕУ великої потужності висота вежі досягає 75 м. Звичайно це циліндричні щогли, хоча застосовуються й ґратчасті вежі;

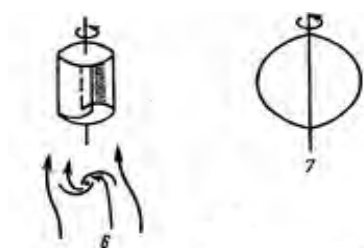
- підстава (фундамент) - призначено для запобігання падіння установки при сильному вітрі. [1]

Вітротурбіна з горизонтальною віссю (рис. 1.4, а). Розглянемо горизонтально-осьові вітротурбіни пропелерного типу. Основною обертаючою силою в колісі цього типу є піднімальна сила. Щодо вітру вітроколесо в робочому положенні може розташовуватися перед опорною вежею або за нею. При переднім розташуванні

вітротурбіна повинна мати аеродинамічний стабілізатор або який-небудь інший пристрій, що втримує його в робочому положенні. При заднім розташуванні вежа частково затінює вітроколесо й турбулізує потік, що набігає на нього. При роботі колеса в таких умовах виникають циклічні навантаження, підвищений шум і флуктуації вихідних параметрів вітроустановки. Напрямок вітру може змінюватися досить швидко, і вітроколесо повинне чітко відслідковувати ці зміни. Тому у ВЭУ потужністю більше 50 кВт для цієї мети використовуються електричні серводвигуни.



а)



б)

Рисунок 1.4 - Класифікація вітротурбін: а) - з горизонтальною віссю; б) - з вертикальною віссю: 1 - однолопатеве колесо; 2 - двохлопатеве; 3 - трилопатеве; 4 - багатолопатеве; 5 - ротор Савониуса; 6 - ротор Дар'ї

У вітроелектрогенераторах звичайно використовуються двох- і трилопатеві вітротурбіни (рис.1.4), останні відрізняються дуже плавним ходом. Електрогенератор і редуктор, що з'єднує його з вітроколесом, розташовані звичайно на верху опорної вежі в поворотній головці, У принципі їх зручніше розмішати внизу, але виникаючі при цьому складності з передачею крутного моменту знецінюють переваги такого розміщення. Багатолопатові колеса, що розвивають великий крутний момент при

слабкому вітрі, використовуються для перекачування води й інших цілей, що не вимагають високої частоти обертання вітрового колеса.

Вітроелектрогенератори з вертикальною віссю (рис. 1.4, б). Вітроелектрогенератори з вертикальною віссю обертання внаслідок своєї геометрії при будь-якому напрямку вітру перебувають у робочому положенні. Крім того, така схема дозволяє за рахунок тільки подовження вала встановити редуктор з генераторами внизу вежі.

Принциповими недоліками таких установок є: а) набагато більша схильність їх до втомних руйнувань через більш часто виникаючих у них автоколивальних процесів; б) пульсація крутного моменту, що приводить до небажаних пульсацій вихідних параметрів генератора. Через це переважну більшість вітроелектрогенераторів виконано за горизонтально-осьовою схемою, однак дослідження різних типів вертикально-осьових установок тривають. [4]

Промисловістю випускаються вітродвигуни двох типів: тихохідні багатолопатеві й швидкохідні малолопатові. Відмінною рисою тихохідних багатолопатових вітродвигунів є здатність їх рушати з місця, тобто починати працювати з підключеним навантаженням при порівняно слабкому вітрі, що пояснюється наявністю великого крутного моменту. Ці двигуни добре використовують малі швидкості вітрів, але погано підтримують постійне число обертів, тому вони не можуть застосовуватися там, де потрібне сталість числа обертів, як, наприклад, для електроосвітлення, але добре працюють на приводі поршневих насосів з постійним включенням навантаження. Через громіздкість вітроколеса тихохідні вітродвигуни не можуть бути виготовлені потужними.

Другий тип вітродвигунів - це швидкохідні малолопатові, що мають вітроколесо з 2 - 3 лопатами. Вони можуть бути більших розмірів і потужностей, аж до вітроколеса діаметром в 50 м. Завдяки можливості порівняно гарного регулювання числа обертів ці двигуни, застосовуються для електрифікації й механізації. Крім того, випускаються малопотужні двигуни з діаметром вітроколеса від 1 до 3,5 м для висвітлення малих приміщень і зарядки акумуляторів. [5]

1.3.3 Класифікація за типом застосовуваної електромашини

Ще одна з найбільше що часто зустрічаються класифікацій, пов'язана з типом застосовуваної електричної машини (рис.1.5).



Рисунок 1.5 - Класифікація ВЕУ за типом застосовуваної електричної машини

1.4 Механічні характеристики вітротурбін

Механічна характеристика ветротурбіни - це залежність величини що розвивається крутного моменту ветротурбіни у функції швидкості ветротурбіни Z , обумовленої як відношення величини окружної швидкості кінця лопати радіусом R до діючого значення швидкості вітру V

$$Z = \frac{\omega \cdot R}{V}. \quad (1.6)$$

Вихідними даними для побудови механічної характеристики вітротурбіни є залежність коефіцієнта потужності C_p від швидкості Z : $C_p = f(Z)$ (рис. 1.6).

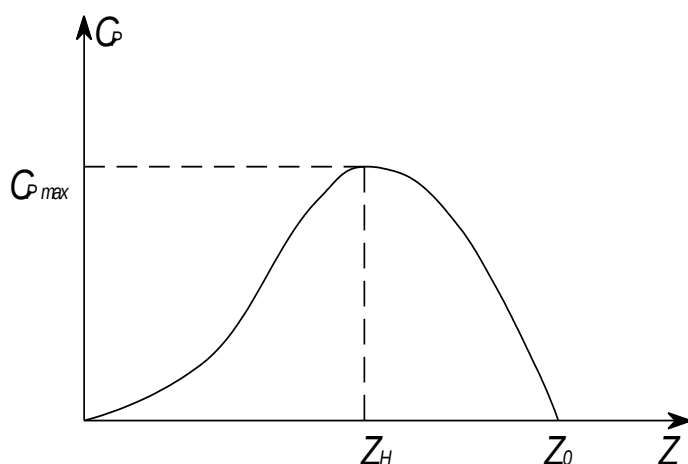


Рисунок 1.6 – Залежність $C_p = f(Z)$

Механічна характеристика вітротурбіни, показана на рис. 1.7, дозволяє визначити наступні параметри:

- $M_{\text{пуск}}$ - значення пускового моменту при кутовій швидкості $\omega = 0$;
- M_{max} – максимальний момент вітротурбіни при заданій швидкості вітрового потоку;
- C_{max} – відповідає режиму максимальної ефективності вітротурбіни;
- ω_0 – швидкість холостого ходу вітротурбіни при відсутності моменту навантаження на валу вітротурбіни.

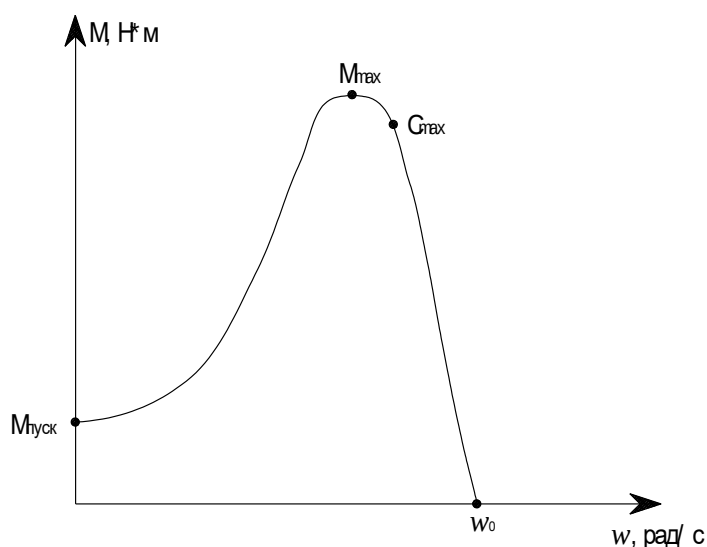


Рисунок 1.7 - Механічна характеристика вітротурбіни

Необхідно відзначити, що в більшості вітротурбін значення пускового моменту

відмінно від нуля. Це означає, що при швидкості вітрового потоку вище номінального, вітротурбіна не може самостійно почати працювати. Запустити в роботу ВЕУ можна тільки шляхом попереднього розгону.

Сімейство механічних характеристик вітротурбіни при постійній геометрії вітротурбіни (рис. 1.8) описується виразом:

$$M_{BT} = \frac{1}{2 \cdot \omega} \cdot \rho \cdot V_B^3 \cdot A_{BT} \cdot C_P(Z_{BT}), \quad (1.7)$$

де ρ – щільність повітря, кг/м^3 ;

V_B – швидкість вітрового потоку, м/с ;

A_{BT} – ефективна площа, ометаема вітротурбіною, м^2 ;

$C_P(Z_{BT})$ – коефіцієнт використання вітротурбіною енергії вітру (коефіцієнт потужності);

$Z_{BT} = \omega_d \cdot R_{BT} / V_B$ – швидкоходність вітротурбіни

При зміні швидкості вітрового потоку точки M_{max} і C_{max} утворять лінії максимальних моментів і лінію оптимального відбору потужності вітротурбіни.

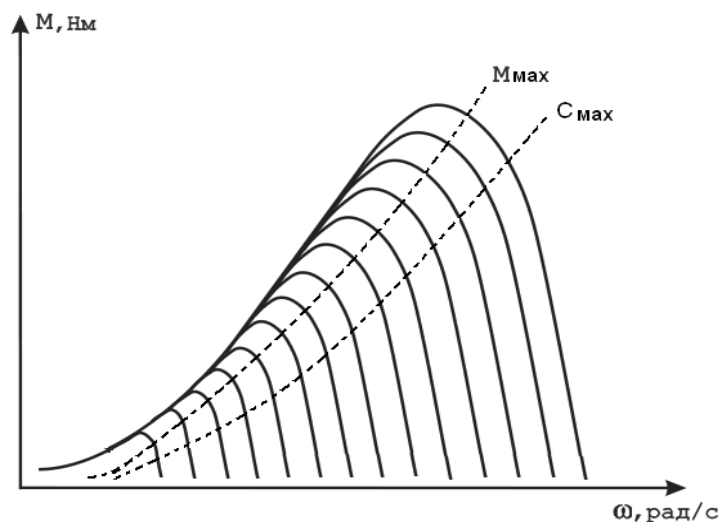


Рисунок 1.8 - Сімейство механічних характеристик вітротурбіни

Швидкоходність вітротурбін є, найважливішим для їхньої характеристики параметром, що залежить від трьох основних змінних: радіуса ометаємою

вітротурбіною окружності, його кутової швидкості обертання й швидкості вітру. Як безрозмірна величина вона є основним параметром подоби при дослідженні й конструюванні вітроелектрогенераторів. [6]

1.5 Імітація поведінки реальних вітротурбін

Експериментальні характеристики вітродвигунів одержують або в аеродинамічній трубці, де створюється штучний повітряний потік, або в природних умовах у вітросиловій лабораторії з вежею, обладнаної спеціальними приладами. Експериментальні характеристики вітродвигунів одержують по інерційному методі Аеродинамічного інституту. Цей метод заснований на законі інерції обертових мас. Щоб повідомити обертовому навколо своєї осі тілу відоме кутове прискорення, необхідна дія на це тіло обертового моменту, величина якого дорівнює моменту інерції тіла, у цьому випадку вітрового колеса, щодо осі його обертання, помноженому на кутове прискорення, тобто

$$M = I \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.8)$$

де M - обертаючий момент;

I - момент інерції обертового тіла;

$\frac{d\omega}{dt}$ – кутове прискорення.

Таким чином, знаючи кутове прискорення в кожний даний момент часу й момент інерції моделі обертової вітротурбіни, можна визначити крутний момент $M = M_{aep}$ моделі, викликаний зовнішніми силами, тобто повітряним потоком в аеродинамічній трубці.

Визначивши для кожного моменту часу значення кутової швидкості ω , знаходять число модулів Z , що відповідає отриманому крутному моменту вітряка M_{aep} , потім будують характеристики $M_{aep} = f(Z)$ і $\xi = f(Z)$.

Експериментальні випробування реальних вітротурбін на вежі в природному вітровому потоці коштовні й необхідні, тому що одержувані при цьому результати в найбільшій мері відбивають роботу вітро двигунів в експлуатації. Повітряний потік в аеродинамічній трубі діє на модель із постійної по величині й напрямку швидкістю, у той час як вітровий потік, що набігає на вітротурбіну в реальних умовах, змінюється й по швидкості й по напрямку. Крім того, вітротурбіни мають різні деталі на крилах, поставлені з метою регулювання числа обертів, і кріплення, які не завжди можна виконати на моделі.

Одержання експериментальних характеристик вітротурбін можуть бути використані для електромеханічних систем що імітують їхнє поведження. Це дозволить проводити випробування електроустаткування ВЕУ в лабораторних умовах у стислий термін без виїзду на спеціалізовані полігони. Крім того, система імітації дозволить випробувати поведження схем електроустаткування ВЕУ у всіх можливих режимах. Адаптація системи імітації (імітатора) під конкретну вітротурбіну має на увазі його реалізацію на базі автоматизованого електропривода (АЕП) з перепрограмувальною мікропроцесорною системою керування (МПСК). Узагальнена структурна схема ВЕУ наведена на рис. 1.9. АЕП імітатора повинен реалізовувати механічні характеристики різних вітротурбін $M_d = f(\omega_d, V_B)$ з урахуванням мультиплікатора (М) при заданих швидкостях вітрового потоку (ВП). При цьому математичний опис параметрів ВП може бути отриманий імовірнісними методами.

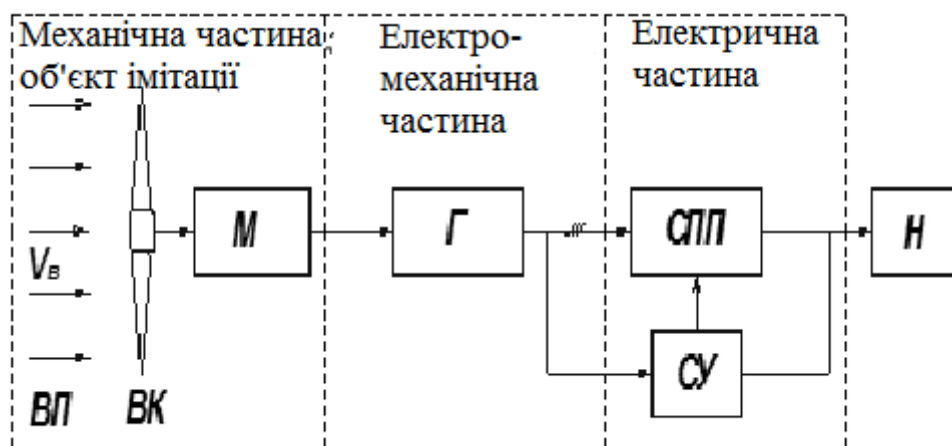


Рисунок 1.9 - Структурна схема ВЕУ

Одним з можливих напрямків розробки АЕП імітатора є його реалізація на базі привода постійного струму (рис. 1.10). Одним з достоїнств ДПС є широке й плавне регулювання швидкості обертання, лінійність і однозначність характеристик, відсутність “самоходу” (при знятті сигналу керування), швидкодія.

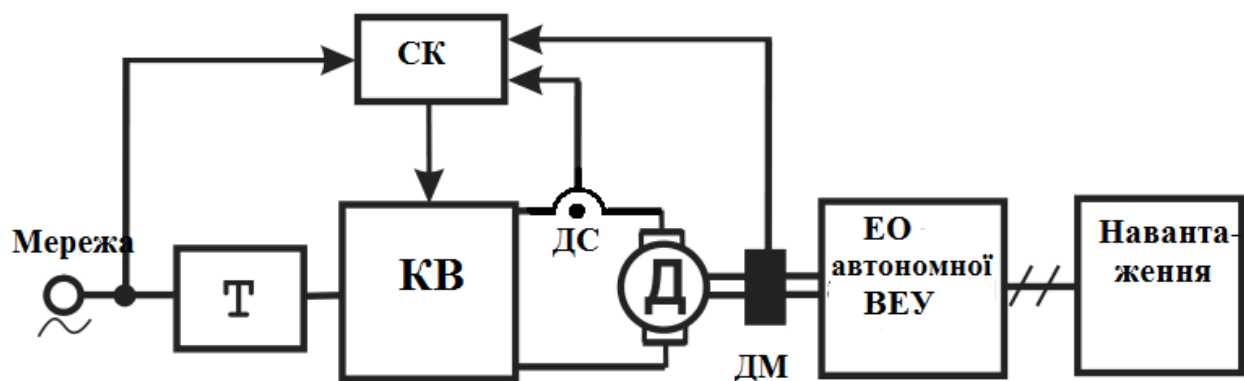


Рисунок 1.11 - Структурна схема АЕП імітатора ВТ

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ МАГІСТЕРСЬКОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Побудова структурно-логічної схеми магістерського дослідження

Методологія – це взаємопов'язана сукупність принципів і підходів дослідницької діяльності, на які спирається дослідник в ході здобуття і розробки знань в рамках конкретного розділу науки [3]. Основне завдання методології науки полягає в забезпеченні евристичної форми пізнання системою строго визначених та апробованих принципів, методів, правил та норм. Ця система формується на основі об'єктивних законів і закономірностей дійсності. Методологія включає в себе вивчення законів, теорій, структури наукового знання, критеріїв науковості і системи використовуваних методів дослідження, і пов'язана з аналізом методів дослідження з точки зору логічної структури і формалізованих підходів до побудови теоретичного знання, його істинності і аргументованості [3, 4].

На підставі головних завдань магістерського дослідження, було складено алгоритм магістерської роботи, відтворений у вигляді структурно-логічної схеми дослідження (рисунок 2.1).

В початковій стадії дослідження проводиться аналіз конструкцій вітротурбін та з метою виявлення особливостей конструкції та їх порівняння. В процесі порівняння виявляються переваги та недоліки конструкції ВТ. Дається оцінка доцільності використання у дослідженні вітротурбіні імітатора ВТ.

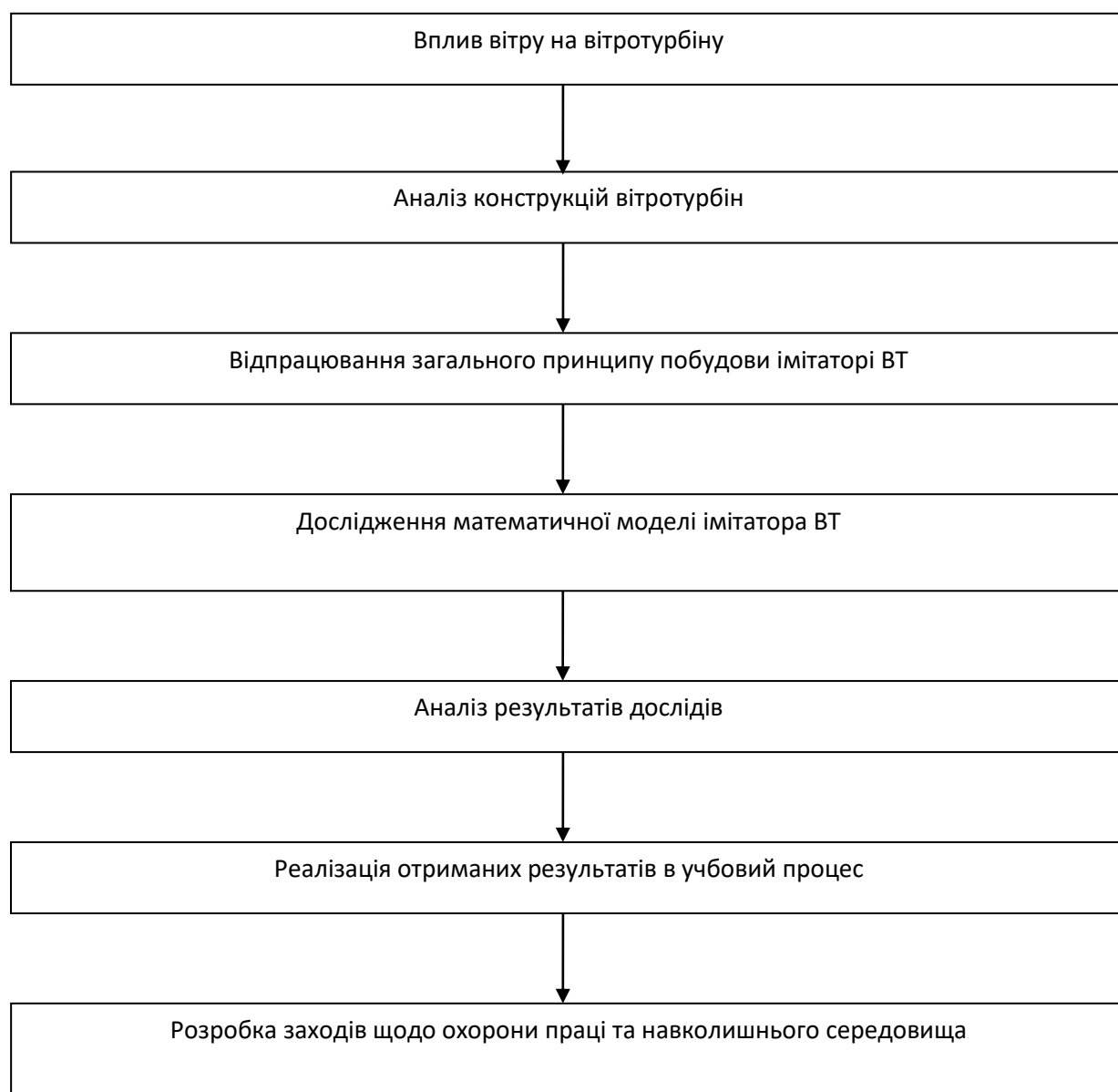


Рисунок 2.1 - Структурно-логічна схема магістерського дослідження

В дослідженні основним методом обрано метод моделювання (вивчення явищ за допомогою побудови математичних моделей складних об'єктів, що приймаються за певною мірою спрощення внутрішніх процесів) завдяки його безпосереднім перевагам при вирішенні складних фізичних завдань, що значною мірою зміцнюються зростанням продуктивності комп'ютерної обчислювальної техніки.

За допомогою моделювання проводиться дослідження математичної моделі системи керування, а потім аналіз отриманих даних.

На заключному етапі роботи проводиться впровадження результатів магістерського дослідження у навчальний процес та розробка заходів охорони праці та навколишнього середовища.

2.2 Методи проведення дослідження

Метод дослідження (грец. *methodos* – шлях до чого-небудь) – це спосіб досягнення мети, спосіб застосування старого знання про раціональні рішення певних завдань для одержання відомостей про новий об'єкт або предмет дослідження [4]. Багато визначень поняття метод дослідження зводиться до того, що це – шлях пізнання, шлях, що веде до об'єктивного знання.

Сукупність методів, прийомів проведення конкретного дослідження становлять методика дослідження. У свою чергу, сукупність методів і методик досліджень, що застосовуються в якій-небудь науці, визначають методологію цієї науки. Як відомо, методологія наукового пізнання в цілому – це навчання про принципи, форми і способи науково-дослідної діяльності.

У самому загальному виді методи, якими користуються дослідники, можна розділити на три групи: загальнологічні методи пізнання (порівняння, аналіз, синтез, абстрагування, моделювання і т.п.), методи емпіричного дослідження (спостереження, опис, вимір, експеримент) і методи теоретичного дослідження (уявний експеримент, ідеалізація, формалізація і т.п.) [3, 4].

Моделювання – це метод дослідження, що полягає в створенні й вивченні моделі, що замінює досліджуваний об'єкт (оригінал), з наступним переносом отриманої інформації на оригінал, це така мислено уявлювана або матеріально реалізована система, що, відображаючи або відтворюючи об'єкт дослідження, здатна замінювати його так, що її вивчення дає нам нову інформацію про цей об'єкт. Моделювання можна розглядати і як особливий вид експерименту, у якому

моделювання одночасно і засіб, і об'єкт дослідження. Його доцільно використовувати в тих випадках, коли важко (або небажано) пряме експериментальне дослідження.

Метод фізичного моделювання передбачає дослідження на моделі, що відтворює основні геометричні, фізичні, динамічні і функціональні властивості "оригіналу" (але не обов'язково всі властивості) і володіє великими можливостями по визначенню різних якостей електромеханічних систем та їх елементів. Цей метод базується на трьох теоремах аналізу подібності [3].

Практично не обмеженими можливостями за виявленням ефективно функціональної складної електромеханічної системи має метод математичного моделювання. Цей метод заснований на здатності математично описувати рівняннями різноманітні за природою явища (процеси) і виявляти різні функціональні зв'язки між елементами системи. При математичному моделюванні застосовують аналітичні та статистичні моделі.

Аналітичні моделі більш грубі, враховують менше число чинників, завжди вимагають деяких припущень і спрощень, проте вони більш пристосовані для пошуку оптимальних рішень. Статистичні методи в порівнянні з математичними громоздкіші та погано осяжні.

Імітаційне моделювання використовується найчастіше при дослідженні складних електромеханічних систем і є процесом формування моделі реакції системи і проведення на ній чисельних експериментів з метою виявлення шляхів її створення, вдосконалення і ефективного використання.

Аналогове моделювання базується на однаковому для моделі і натури математичному описі і використовується для імітації на основі аналогової фізичної системи по її елементах, при цьому кожному з фізичних елементів натури в моделі відповідає еквівалент. В якості моделі використовуються елементи електричного кола, складені з активних і пасивних елементів.

Для моделювання електромеханічних процесів в ВТ з різними параметрами використовуються аналітичні і чисельні методи.

Найпоширенішими серед аналітичних методів є: варіаційні методи Релея-Рітца, Гальоркіна, асимптотичний метод та інші. Однак вони дуже громіздкі і в той же час не враховують багатьох чинників і тому є мало придатними при розрахунках.

Чисельні методи дозволяють отримати практично точне рішення задачі. В основу чисельних методів покладені дискретні розрахункові схеми. В результаті дискретизації континуальна система з незліченною кількістю ступенів свободи зводиться до системи з кінцевим числом ступенів свободи. Найбільший розвиток отримали метод кінцевих елементів, метод кінцевих різниць, метод кінцевих об'ємів та інші.

Експеримент (лат. *experimentum* – проба, досвід) – це метод дослідження, в основі якого лежить цілеспрямований вплив на об'єкт у заданих контрольованих умовах, опосередкований раціональним (в ідеалі теоретичним) знанням. Експеримент передбачає врахування всіх параметрів при постановці наукового дослідження (умов його проведення), він повинен бути достовірним і покликаний підтвердити (або спростувати) висунуті гіпотези, встановити раніше невідомі властивості (характеристики) досліджуваних об'єктів, виявити закономірності протікання явищ і процесів. Експериментом є науково поставлене дослідження або спостереження явища або процесу в умовах, що точно враховуються, дозволяють стежити за ходом експерименту, управляти або відтворювати його кожного разу при повторенні цих умов. Від звичайного, пасивного спостереження експеримент відрізняється активним впливом дослідника на явище, що вивчається. Метою експерименту є перевірка теоретичних положень, а також ширше і глибше вивчення теми наукового дослідження.

Так само, як і теоретичні методи, експерименти поділяються на декілька видів. Експерименти бувають природні і штучні. Природні експерименти характерні при вивченні соціальних явищ в обстановці, наприклад, виробництва, побуту і тому подібне. Штучні експерименти широко застосовують в природничо-наукових дослідженнях.

Інколи виникає необхідність проведення пошукових експериментальних досліджень. Вони потрібні у тому випадку, коли не можна кваліфікувати всі чинники,

що роблять помітний вплив на явище, що вивчається, або процес. На підставі такого експерименту будується програма досліджень в повному об'ємі.

Експериментальні дослідження бувають лабораторні і виробничі.

Виробничі експериментальні дослідження передбачають вивчення процесу в реальних умовах з врахуванням випадкового впливу зовнішнього середовища.

Лабораторні дослідження проводять із застосуванням типових приладів, спеціальних моделюючих установок, стендів, устаткування і так далі. Для підтвердження результатів роботи буде виконано таке дослідження.

2.3 Методи розрахунку поставленої задачі

Математичне моделювання електромеханічних процесів роботи КЕП проводилося на ЕОМ з використанням програмного середовища *Matlab* та його графічної надстройки *Simulink*. Завдяки вбудованим програмним функціям і бібліотечним блокам використання даного програмного продукту дозволяє провести математичне моделювання багатьох складних систем. Окрім того *Simulink* реалізує принцип візуального програмування, що суттєво спрощує процес побудови математичної моделі, а саме складних диференціальних рівнянь що відображають процеси перетворення енергії в ВТ, та впроваджує високий рівень наглядності системи, що розробляється в процесі синтезу [5].

Найбільш ефективним методом розрахунку характеристик перехідних процесів електромеханічних систем та машин є метод кінцевих елементів. Суть методу кінцевих елементів полягає в тому, що мінімізація функціонала варіаційної задачі здійснюється на сукупності функцій, кожна з яких визначена на своїй під області [6]. Область, в якій шукається вирішення диференціальних рівнянь, розбивається на кінцеву кількість підобластей (елементів). У кожному з елементів довільно вибирається вигляд апроксимуючої функції. У простому випадку це поліном першого ступеня. Поза своїм елементом апроксимуюча функція дорівнює нулю. Значення функцій на кордонах елементів (вузлах) є рішенням задачі і заздалегідь невідомо. Коефіцієнти апроксимуючих функцій зазвичай шукаються з умови рівності значення

сусідніх функцій на кордонах між елементами (у вузлах). Потім ці коефіцієнти виражаються через значення функцій у вузлах елементів. Складається система лінійних рівнянь алгебри. Кількість рівнянь дорівнює кількості невідомих значень у вузлах, на яких шукається вирішення вихідної системи, прямо пропорційно кількості елементів і обмежується лише можливостями обчислювальної техніки. Оскільки кожен з елементів пов'язаний з обмеженою кількістю сусідніх, система лінійних рівнянь алгебри має розряджений вигляд, що істотно спрощує її рішення. Використання систем кінцево-елементного аналізу робить можливим дослідження об'єктів без створення їх матеріального прототипу, шляхом складання та рішення адекватної математичної моделі.

Для чисельного розрахунку диференціальних рівнянь математичних моделей в *Simulink* було використано метод Дормана-Прінца. Цей метод є членом сімейства підходів на базі метода Рунге-Кутта для вирішення звичайних диференціальних рівнянь. Зокрема, він використовує шість оцінок функції для обчислення четвертого і п'ятого порядку точності рішення [5, 7]. Різниця між цими рішеннями, потім приймається за помилку (четвертого порядку) рішення. Ця оцінка похибки є дуже зручною для нелінійних алгоритмів вибору кроку інтегрування, що широко використовуються в сучасних обчислювальних програмах. Метод Дормана-Прінца має сім ступенів, але він використовує тільки шість оцінок функції за кроком, тому що має властивість FSAL (First Same As Last – перший такий же як останній): останній етап оцінюється в тій же точці, як і перший етап до наступного кроку. Дорман і Прінц вибрали коефіцієнти для методу, щоб мінімізувати помилки п'ятого порядку рішення. Це основна відмінність від методу Фельберга, який було побудовано таким чином, що рішення четвертого порядку має невелику помилку. З цієї причини метод Дормана-Прінца більше підходить, коли вищі рішення використовується для продовження інтеграції, на практиці дані явища відомі як місцеві екстраполяції [8].

2.4 Висновки по розділу 2

В даному розділі розглядається методологія проведення магістерського дослідження впливу вітру на вітротурбіну. Важливою пізнавальною процедурою при плануванні й організації дослідницького процесу є визначення методологічних основ дослідження, вибір методів його проведення і перетворення їх потім у конкретні дослідницькі кроки та теоретичні висновки. З метою повного вирішення задачі, діючи на підставі поставленого завдання, була розроблена структурно-логічна схема магістерського дослідження (рисунок 2.1), що відображає всі етапи проведення роботи. Основну увагу було приділено теоретичній частині, до якої віднесено математичне моделювання електромеханічних процесів в ВТ з нелінійним принципом керування. Дослідженню підлягають системи автоматичного керування з наявністю змінних параметрів.

В даному розділі аналізуються найбільш ефективні методи проведення досліджень складних електромеханічних систем. На основі проведеного огляду було прийнято рішення використати метод математичного моделювання систем керування, що з розвитком сучасної обчислювальної техніки дозволяє відносно просто проводити дослідження об'єкта, при якому безпосередньо вивчається не сам об'єкт, а деяка допоміжна штучна система, яка є еквівалентом об'єкта. Вона відображає в математичній формі його найважливіші властивості – закони, яким він підкоряється; зв'язки, властиві його складовим частинам, тощо. Таким чином, на основі дослідження ВТ в математичних моделях імітатора можливо отримати характеристики реального об'єкта, що розглядається.

В пункті 2.3 проводиться обґрунтований вибір методів чисельних розрахунків перехідних характеристик математичних моделей. На підставі фактично не обмежених можливостей моделювання було обрано обчислювальне програмне середовище *Matlab*, що за рахунок спеціально розроблених бібліотек впроваджує високий рівень точності, адекватності та наглядності при розгляді математичних моделей складних реальних об'єктів.

РОЗДІЛ 3

ЕЛЕКТРОПРИВОД ІМІТАТОРА ВЕУ

3.1 Структура електропривода

Електропривод - електромеханічна система, що складається в загальному випадку із взаємодіючих електричних перетворювачів, що управляють і інформаційних пристроїв і пристроїв сполучення із зовнішніми суміжними електричними, механічними, керуючими й інформаційними системами, призначена для надавання руху виконавчих органів робочої машини й керування цим рухом з метою здійснення технологічного процесу.

Базовим елементом будь-якого електропривода є електрична машина (електродвигун), що здійснює властиво електромеханічне перетворення енергії. Оснащення електропривода силовими електронними перетворювачами електричної енергії й мікропроцесорних інформаційно-керуючих пристроїв перетворює його в потужний інтелектуальний інструмент автоматизації різних виробничих і технологічних процесів. Такий привод є регульованим автоматизованим електроприводом.

Електропривод має два канали - силовий і інформаційний (рис. 3.1). По першому транспортується перетворена енергія (широкі стрілки на рис. 3.1), по другому здійснюється керування потоком енергії, а також збір і обробка відомостей про стан і функціонування системи, діагностика її несправностей (тонкі стрілки на рис. 3.1).

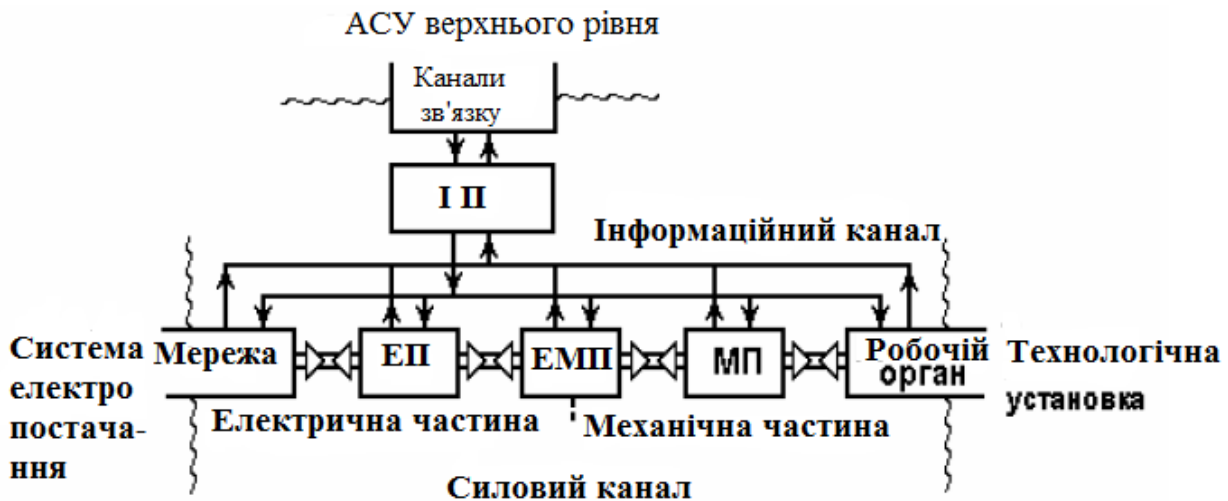


Рисунок 3.1 - Загальна структура електропривода

Силовий канал у свою чергу складається із двох частин - електричної і механічної й обов'язково містить ланку сполуки - електромеханічний перетворювач.

В електричну частину силового каналу входять електричний перетворювач ЕП, що передають електричну енергію від джерела живлення (шин промислової електричної мережі, автономного електричного генератора, акумуляторної батареї й т.п.) до електромеханічного перетворювача ЕМП і назад і здійснюючі, якщо це потрібно, перетворення електричної енергії.

Механічна частина складається з рухливого органа електромеханічного перетворювача, механічних передач і виконавчого органа установки, у якому корисно реалізується механічна енергія. Електромеханічний перетворювач ЕМП (електродвигун), завжди присутній в електроприводі, перетворить електричну енергію (U, I) у механічну (M, ω) і назад.

Електродвигуни розрізняють:

- по роду струму (постійного, змінного);
- по кількості й схемі з'єднання обмоток;
- по конструктивному виконанню.

Найпоширеніші електродвигуни:

- колекторні двигуни постійного струму (ДПС) з незалежним (паралельним), послідовним, змішаним збудженням;

- двигуни змінного струму асинхронні з короткозамкненим ротором АД КЗ, асинхронні з фазним ротором АД ФР, синхронні СД.

Електрична машина працює в результаті взаємодії, що змінюються в часі магнітного поля (потіку) і струму в контурі:

- у ДПТ - нерухливий магнітний потік полюсів статора й обмотка, що рухається, якоря зі змінним струмом;
- у АД - обертове магнітне поле статора й обертова, але з іншою швидкістю, обмотка ротора зі струмом.

У ДПТ обмотки розміщені на статорі й на роторі.

Статор ДПТ - індуктор з головними полюсами, на яких розміщені обмотки збудження, що створюють магнітний потік Φ . Тут же можуть бути розміщені додаткові полюси й компенсаційна обмотка, які не беруть участь у процесі електромеханічного перетворення.

Ротор ДПТ - якір з обмоткою якоря й колектором. струмоподвод до обмотки якоря забезпечує щітковий механізм. Колектор є механічним перетворювачем постійного струму в змінний струм обмотки якоря.

Механічний перетворювач (передача) – редуктор, пара гвинт-гайка, система блоків, кривошипно-шатунний механізм і т.п. здійснює узгодження моменту M і швидкості ω двигуна з моментом M_m (зусиллям F_m) і швидкістю ω_m робочого органа технологічної машини.

Величини, що характеризують преутворену енергію, - напруги, струми, моменти (сили), швидкості називають координатами електропривода.

Основна функція електропривода складається в керуванні координатами, тобто в їх примусовій спрямованій зміні відповідно до вимог технологічного процесу, що обслуговується.

Керування координатами повинне здійснюватися в межах, дозволених конструкцією елементів електропривода, чим забезпечується надійність роботи системи. Ці припустимі межі звичайно пов'язані з номінальними значеннями координат, призначеними виробниками встаткування й що забезпечує його оптимальне використання.

Електропривод взаємодіє із системою електропостачання або джерелом електричної енергії, з одного боку, з технологічною установкою або машиною, з іншого боку, і нарешті, через інформаційний перетворювач ІП з інформаційною системою більше високого рівня, часто з людиною - оператором, із третьої сторони (рис. 3.1).

Можна вважати, що електропривод як підсистема входить у зазначені системи, будучи їхньою частиною. Дійсно, фахівця з електропостачання електропривод звичайно цікавить як споживач електроенергії, технолога або конструктора машин - як джерело механічної енергії, інженера, що розробляє або експлуатує АСУ, - як розвитий інтерфейс, що зв'язує його систему з технологічним процесом або системою електропостачання.

Практично всі процеси, пов'язані з механічною енергією, рухом, здійснюються електроприводом. Виключення становлять лише автономні транспортні засоби (автомобілі, літаки, деякі види рухливого состава, судів), що використовують неелектричні двигуни. У відносно невеликому числі промислових установок використовується гідропривід, ще рідше - пневмопривод.

Настільки широке, практично повсюдне поширення електропривода обумовлене особливостями електричної енергії - можливістю пересувати її на будь-які відстані, постійною готовністю до використання, легкістю перетворення в будь-які інші види енергії.

Сьогодні в приладових системах використовуються електроприводи, потужність яких становить одиниці мікроват; потужність електропривода компресора на перекачувальний газ станції – десятки мегават, тобто діапазон сучасних електроприводів по потужності перевищує 10^{12} . Такого ж порядку й діапазон по частоті обертання: в установці, де витягаються кристали напівпровідників, вал двигуна повинен робити 1 оберт у кілька десятків годин при дуже твердих вимогах до рівномірності руху; частота обертання шліфувального кола в сучасному гарному верстаті може досягати 150000об/хв.

Але особливо широкий діапазон застосувань сучасного електропривода: від штучного серця до крокуючого екскаватора, від вентилятора до антени

радіотелескопа, від пральної машини до гнучкої виробничої системи. Саме ця особливість - найтісніша взаємодія з технологічною сферою - робила й робить на електропривод потужний стимулюючий вплив. Безупинно зростаючі вимоги з боку технологічних установок визначають розвиток електропривода, удосконалювання його елементарної бази, його методології. У свою чергу, електропривод що розвивається позитивно впливає на технологічну сферу, забезпечує нові, недоступні раніше можливості.

З енергетичної точки зору електропривод - головний споживач електричної енергії: сьогодні в розвинених країнах він споживає більше 60% всієї виробленої електроенергії. В умовах дефіциту енергетичних ресурсів це робить особливо гостру проблему енергозбереження в електроприводі й засобах електропривода.

Фахівці вважають, що сьогодні заощадити одиницю енергетичних ресурсів, наприклад 1 т умовного палива, удвічі дешевше, ніж її добути. Неважко бачити, що в перспективі це співвідношення буде змінюватися: добувати паливо стає усе суужніше, а запаси його всі убувають.

3.2 Електромеханічна система імітатора ВТ на базі електропривода постійного струму

Експериментальний стенд імітатора вітротурбіни являє собою автоматизований електропривод постійного струму. Структурна схема автоматизованого електропривода постійного струму представлена на рис. 3.2, вона складається з: трансформатора (Тр), що живиться від мережі, трифазного мостового керованого випрямляча (КВ), фільтра що згладжує (Ф), електродвигуна (ЕД), датчика струму (ДС), датчика швидкості (ДШ), системи керування (СК) і навантаження. Навантаженням є система електроустаткування ВЕУ (ЕО ВЕУ). КВ створює на валу ЕД механічний момент подібний до механічного моменту реальної вітротурбіни згідно; а СК, на основі поточного стану системи, обчислює момент завдання M_z і здійснює керування КВ імітатора з метою реалізації цього завдання.

Дана схема побудована по системі підпорядкованого регулювання.

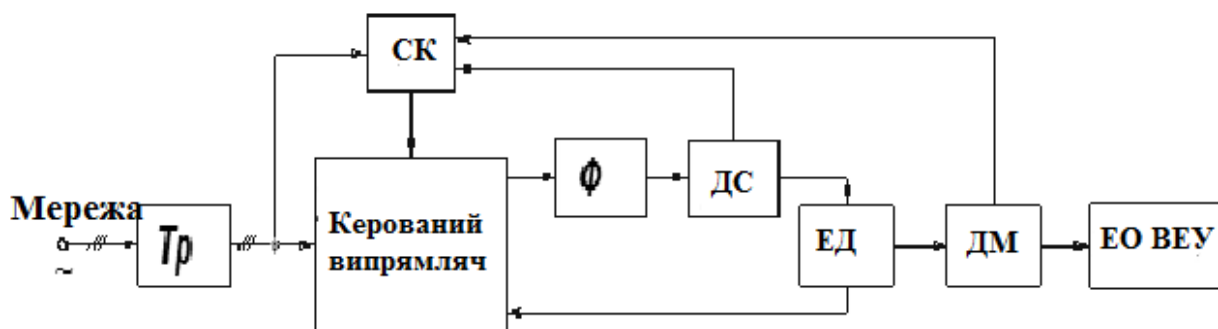


Рисунок 3.2 - Структурна схема автоматизованого електропривода постійного струму імітатора ВТ

Завдяки ортогональності двох моментотворюючих складових - струму якоря й магнітного потоку, керування ДПС однозначно й просто реалізоване: два незалежних регулятори в колі якоря й у колі збудження. Найбільш ефективні для цього кола силові напівпровідникові перетворювачі (СНП) - тиристорні випрямлячі.

Саме простотою процесу керування й наявністю технічних засобів керування (електромеханічні, іонні, а потім напівпровідникові перетворювачі) обумовлене переважне застосування регульованих електроприводів постійного струму. При тому, що ДПС через наявність колектора й щіткового вузла значно дорожче й складніше в експлуатації, чим двигуни змінного струму.

Основною схемою перетворення в електроприводі є трифазна мостова (обґрунтування вибору такої схеми описано в розділі 3).

Переваги керованих перетворювачів, виконаних таким чином, - відсутність обертових машин, не вимагають обслуговування, мають високу швидкодію. Недоліки - низький коефіцієнт потужності $\cos\alpha \approx \cos\phi$, перекося напруги живильної мережі, важко компенсуєми при значних потужностях, необхідність у двох комплектах вентилів для роботи в чотирьох квадрантах, необхідність у зрівняльних реакторах що згладжують. [9]

Система тиристорний перетворювач-двигун (система ТП-Д) є штатним технічним рішенням практично скрізь, де використовується електропривод постійного струму. Схема електрична принципова системи тиристорний

перетворювач - ДПС незалежного збудження представлена на рис. 3.3. Для живлення кола обмотки збудження ДПС застосовується однофазний мостовий випрямляч, виконаний на діодах.

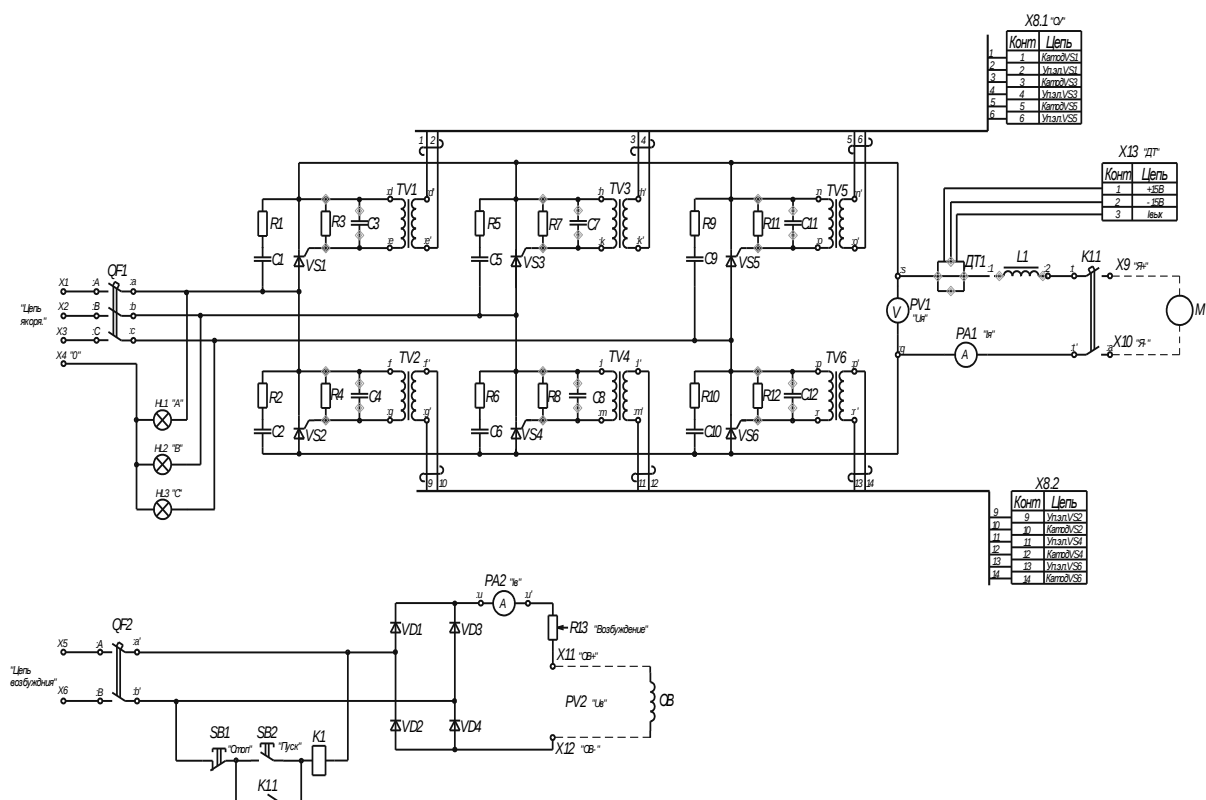


Рисунок 3.3 - Схема електрична принципова системи керування випрямляч - двигун постійного струму незалежного збудження

3.3 Електромагнітні процеси в СНП електропривода імітатора віртотурбіни

При розгляді механічних характеристик передбачалося, що перетворювач завжди працює в режимі безперервного постійного струму (струму якорного кола) - діаграма струму на рис. 3.4, а. Фактично ж при малих моментах навантаження на валу двигуна в кривій постійного струму з'являються розриви й струм стає переривчастим (рис. 3.4, в). Рисунок 3.4, б ставиться до граничного випадку.

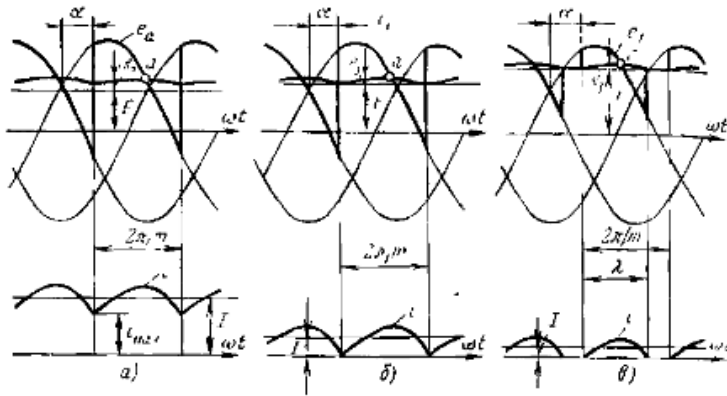


Рисунок 3.4 - Діаграми постійної напруги й струму при різних режимах: а) - безперервний; б) - граничний; в) - переривчастий

Коло постійного струму містить активні опори R_{γ} (якірного кола двигуна й дроселя, що згладжує) і R_{tp} (трансформатора), а також відповідні індуктивності L_{γ} й L_{tp} . Зневажимо для простоти значеннями R_{mp} і L_{mp} . Тоді крива миттєвих значення постійної напруги U_d на виході перетворювача буде визначатися відрізками синусоїд фазових ЕРС трансформатора (рис. 3.4, а в), тобто $U_d = e_d$.

При зазначених допущеннях на ділянці роботи одного вентиля перетворювача для кола постійного струму справедливо наступне рівняння електричної рівноваги:

$$e_d - E = i \cdot R_{\gamma} + L_z \cdot \frac{di}{dt} \quad (3.1)$$

де E - ЕРС якоря, що за час роботи одного вентиля можна вважати постійною;

$\frac{di}{dt}$ - швидкість зміни миттєвого значення постійного струму;

$L_z \cdot \frac{di}{dt}$ - ЕРС самоіндукції, що наводиться в обмотках якоря двигуна й дроселя, що згладжує.

Відповідно до рівняння (3.1) на рис. 3.4, а - у побудовані діаграми зміни в часі струму й напруг силового кола перетворювач - двигун.

У режимі безперервного струму (рис. 3.4, а) після відкриття чергового вентиля він сприймає весь струм навантаження ($I_{нач}$, оскільки $e_d > E$). Далі струм I

зростає до тих пір, поки e_d стане більше суми $E + i \cdot R_{\text{я}}$. При цьому

$$\frac{di}{dt} > 0$$

А ЕРС самоіндукції спрямована назустріч струму й визначається відповідно до рівняння (3.1) як:

$$L_z \cdot \frac{di}{dt} = e_d - E - i \cdot R_{\text{я}}. \quad (3.2)$$

У міру зменшення різниці між e_d і E швидкість зростання струму $\frac{di}{dt}$ й ЕРС самоіндукції зменшуються й стають рівними нулю в точці а, у якій $e_d = E + i \cdot R_{\text{я}}$. Починаючи із цієї точки $e_d < E + i \cdot R_{\text{я}}$, а потім і $e_d < E$. Отже, після точки а струм I буде зменшуватися й $\frac{di}{dt} < 0$, але при цьому ЕРС самоіндукції змінить свій знак і, складаючись із e_d , забезпечить протікання струму в колишньому напрямку, оскільки $e_d + L_z \cdot \frac{di}{dt} > E$. При більших значеннях моменту навантаження на валу двигуна, тобто при більших середніх значеннях I постійного струму, електромагнітної енергії, запасеної в індуктивності $L_{\text{я}}$ при $\frac{di}{dt} > 0$, виявляється досить для того, щоб при віддачі цієї енергії на ділянці $\frac{di}{dt} < 0$ зберегти до кінця інтервалу провідності вентиля $2\pi/q \cdot m$ значення струму $i = i_{\text{нач}}$. Потім вступить у роботу наступний ventиль і т.д.

Зі зменшенням навантаження двигуна кутова швидкість його й ЕРС E зростають, а середній струм I і значення $i_{\text{нач}}$ зменшуються. Нарешті, при струмі $I = I_{\text{гр}}$ настає такий режим, коли тривалість протікання струму через ventиль як і раніше залишається рівної $2\pi/q \cdot m$; але на початку й наприкінці інтервалу провідності $i = 0$. Такий режим називається граничний (рис. 3.12, б).

У режимі безперервного струму середнє значення постійної ЕРС E_n визначається при $\alpha = \text{const}$ вираженням:

$$E_n = E_d = E_{d0} \cdot \cos \alpha. \quad (3.3)$$

Подальше зменшення навантаження на валу двигуна приводить до того, що швидкість і ЕРС E двигуна при тій же значенні α ще більше зростають, а струм I стає менше I_{cp} . У цьому випадку електромагнітної енергії, що запасасться в індуктивності $L_{\text{я}}$ при $\frac{di}{dt} > 0$, буде недостатньо для підтримки струму протягом усього інтервалу $2\pi/q \cdot m$, і струм i приймає нульове значення раніше, ніж відкриється черговий клапан (рис. 3.4, в). Струм стає переривчастим. У цьому режимі протягом проміжку $2\pi/q \cdot m - \lambda$ струм дорівнює нулю. При цьому напруга на виході перетворювача дорівнює ЕРС двигуна E , а обертання двигуна підтримується за рахунок енергії, запасеної в масах, що рухаються, привода.

Вплив режиму переривчастого струму зводиться до збільшення середнього значення постійної напруги на навантаженні в порівнянні з режимом безперервного струму. При зменшенні струму навантаження ЕРС двигуна прагне до максимального значення постійної ЕРС e_{dmax} , що залежить від кута регулювання α . У режимі переривчастого струму двигун поводить себе як конденсатор, запасуючи енергію на ділянках, де протікає струм, і витрачаючи її, коли струм дорівнює нулю.

Ширина зони переривчастих струмів, тобто значення I_{cp} , залежить від сумарної індуктивності кола постійного струму $L_{\text{я}} + L_{mp}$ і кута α :

$$I_{cp} = \frac{E_{d0} \cdot \sin \alpha}{\omega \cdot (L_{\text{я}} + L_{mp})} \left(1 - \frac{\pi}{q \cdot m} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{q \cdot m} \right). \quad (3.4)$$

Звичайно завдяки наявності дроселя, що згладжує, зона переривчастих струмів, особливо для багатofазних схем випрямлення, досить мала. У більшості випадків значення $I_{cp \text{ max}}$ при $\alpha = 90^\circ$ менше, ніж мінімальний струм I_{min} експлуатаційного навантаження двигуна.

3.4 Вибір схеми випрямляча (етап структурного синтезу)

Необхідно спроектувати випрямляч для забезпечення керування двигуном постійного струму типу П42 зі струмом не більше номінального струму якоря й забезпечити тривалу роботу з номінальним моментом (струмом) при номінальній швидкості обертання з постійним потоком збудження. Параметри двигуна: $P_n = 7400$ кВт, $U_{ян} = 257$ В, $n_n = 3000$ об/хв. Припустимі пульсації струму якоря не більше 7 % $I_{дн}$. Обмотка збудження $U_B = 220$ В. Потрібно визначити параметри мережного трансформатора, параметри вентилів випрямлячів якірного кола й обмотки збудження, параметри дроселів, що згладжують, випрямлячів.

Проектування нового випрямляча містить два якісно різних етапи:

- етап структурного синтезу, на якому визначається структура (принципова схема) випрямляча.
- етап параметричного синтезу, на якому розраховуються параметри елементів обраної структури (принципової схеми) випрямляча. [13]

Формальних (математичних) методів синтезу структур вентильних перетворювачів на вимогу завдання поки в силовій електроніці практично ні, хоча дослідження в цьому напрямку проводяться. Тому процедура синтезу схеми випрямляча зводиться до процедури її вибору з безлічі відомих на підставі знання їхніх властивостей. Таким чином, необхідна база даних по схемах випрямлячів. У тих випадках, коли не вдається вибрати підходящу схему випрямляча із числа відомих, буде потрібно або винахід нової схеми, або коректування завдання на проектування випрямляча.

На рис. 3.5 наведений приклад алгоритму вибору схеми випрямляча виходячи із трьох заданих параметрів виходу випрямляча (P_{d0} , U_{d0} , I_d) з врахуванням у векторі властивостей схеми тільки двох компонентів: використання типової потужності трансформатора й використання вентилів по зворотній напрузі.

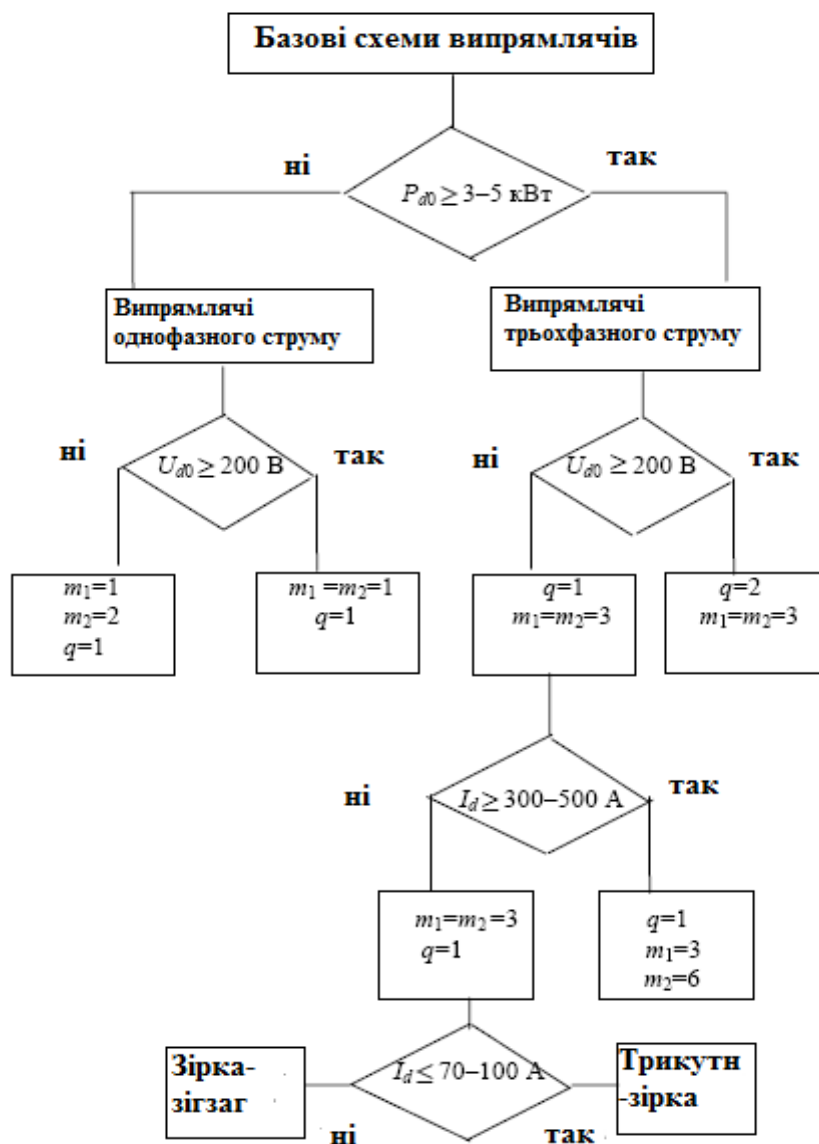


Рисунок 3.5 - Алгоритм вибору схеми випрямляча

Відповідно до завдання на проектування й алгоритмом вибору схеми випрямляча по рис. 3.5 наш випрямляч повинен бути трифазним ($P_{d0} = 7400 \text{ кВт}$) і двохпівперіодним (мостова схема), тому що потрібно досить висока випрямлянна напруга. Випрямляч обмотки збудження також трифазний, але у зв'язку з невисоким значенням випрямленої напруги може бути виконаний по однопівперіодній схемі. Оскільки коефіцієнти перетворення по напрузі обраних схем випрямлячів розрізняються у два рази і їх необхідні випрямленні напруги також розрізняються у два рази, можливий варіант живлення обох схем від однієї системи вторинних обмоток трансформатора.

3.5 Розрахунок параметрів елементів схеми керованого випрямляча (етап параметричного синтезу)

На рис. 3.6 представлена спрощена схема трифазного мостового керованого випрямляча для розрахунку параметрів основних елементів.

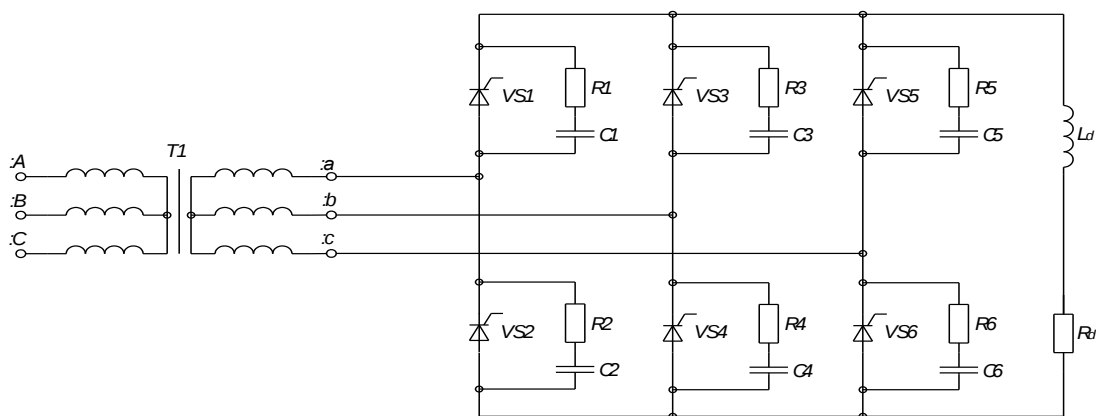


Рисунок 3.6 - Спрощена схема трифазного керованого випрямляча

Напруга живильної мережі за стандартом на якість електричної енергії може максимально відхилятися від номіналу до $\pm 10\%$. Тому необхідно забезпечити номінальне випрямлення напруги й при мінімально можливій напрузі мережі, при цьому кут регулювання α у випрямлячі раціонально мати рівним нулю. Тоді, з огляду на, $U_{я.н.} = U_{d0}$, маємо:

$$U_{2\min} = \frac{U_{dном}}{2,34} = \frac{257}{2,34} = 109,8 \text{ В}, \quad (3.5)$$

враховуючи, що обмотки трансформатора будуть з'єднані за схемою зірка-зірка й коефіцієнт трансформації вхідного трансформатора:

$$K_T = \frac{U_{1\min}}{U_{2\min}} = \frac{0,9 \cdot 220}{109,8} = 2. \quad (3.6)$$

Середнє значення анодного струму вентиля:

$$I_a = \frac{I_{\text{дном}}}{3} = \frac{39,8}{3} = 13,26 \text{ А.} \quad (3.7)$$

Діюче значення анодного струму вентиля:

$$I_{\text{ад}} = \frac{I_{\text{дном}}}{\sqrt{3}} = \frac{39,8}{\sqrt{3}} = 22,97 \text{ А.} \quad (3.8)$$

Вибираємо тиристор за середнім значенням анодного струму з урахуванням того, що тут коефіцієнт амплітуди $K_a=2$, а робоча зворотна напруга повинна вибиратися по формулі:

$$U_{\text{ер}} \geq \frac{U_{\text{е max}} \cdot K_{\text{КП}} \cdot K_3}{K_p} = \frac{\sqrt{6} \cdot 122 \cdot 1,4 \cdot 1,1}{0,8} = 575 \text{ В,} \quad (3.9)$$

де $U_{\text{е max}} = \sqrt{6} \cdot U_{2\text{ном}} \text{ В}$ – розрахункова зворотна напруга, рівна амплітуді лінійної Е.Р.С. трансформатора при максимальній напрузі живильної мережі;

$K_{\text{КП}}=1,4$ – коефіцієнт, що враховує наявність комутаційних перенапруг;

$K_3=1,1$ – коефіцієнт запасу;

$K_p=0,8$ – коефіцієнт співвідношення, що рекомендується, між робочою й припустимою повторюваною напругою на вентилі.

Це тиристор Т 132-50, що має наступні параметри: динамічний опір у відкритому стані – $R_{\text{дин}} = 4,6 \text{ мОм}$, гранична напруга – $U_0 = 1,03 \text{ В}$, максимально припустима температура переходу – $T_{jm} = 125 \text{ }^\circ\text{С}$. [15] Діюче значення вторинного струму трансформатора:

$$I_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{\text{дном}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 39,8 = 32,5 \text{ А.} \quad (3.10)$$

Діюче значення первинного струму трансформатора:

$$I_1 = \frac{1}{K_T} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{\text{дном}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 39,8 = 16 \text{ А.} \quad (3.11)$$

Розрахункова потужність обмоток трансформатора:

$$S_T = K_{np} \cdot P_d = K_{np} \cdot U_d \cdot I_d = 1,05 \cdot 257 \cdot 39,8 = 10740 \text{ ВА.} \quad (3.12)$$

За довідковими даними вибираємо трансформатор типу ТСЗ-10/0.38, який має наступні параметри:

- номінальна потужність $S = 10 \text{ кВа}$;
- номінальна частота $f = 50 \text{ Гц}$;
- втрати холостого ходу $P_{x.x.} = 650 \text{ Вт}$;
- втрати короткого замикання $P_{к.з.} = 250 \text{ Вт}$;
- струм холостого ходу $I_{x.x.} = 7,5\%$;
- напруга короткого замикання $U_{к.з} = 3,5\%$.

Через ці параметри трансформатора визначимо потрібні нам параметри елементів Т-подібної схеми заміщення трансформатора.

Модуль повного опору короткого замикання трансформатора:

$$Z_{1к} = \frac{U_{к.з.}}{I_{1н}} = \frac{0,035 \cdot 220}{16} = 0,48 \text{ Ом.} \quad (3.13)$$

Активний опір обмоток трансформатора, приведений до первинної сторони:

$$R_{TP} = R_1' + R_2' = \frac{\Delta P_{к.з.}}{3 \cdot I_{1н}^2} = \frac{250}{3 \cdot 16^2} = 0,32 \text{ Ом.} \quad (3.14)$$

Реактивний опір розсіювання обмоток трансформатора, приведений до первинної сторони:

$$X_{1к} = \sqrt{Z_{1к}^2 - R_{TP}^2} = \sqrt{(0,48)^2 - (0,32)^2} = 0,35 \text{ Ом.} \quad (3.15)$$

Тоді той же опір, приведений до вторинних обмоток трансформатора й названий вже анодним опором X_a , буде дорівнює:

$$X_a = \frac{X_{1к}}{K_T^2} = \frac{0,35}{2^2} = 0,089 \text{ Ом,} \quad (3.16)$$

$$L_a = \frac{X_a}{\omega} = \frac{0,089}{314} = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (3.17)$$

3.6 Перевірка вентилів по тепловому режиму

Перевіряємо тепловий режим обраного вентиля по усередненій температурі напівпровідникової структури:

$$\Theta_{ст} = \Theta_{ос} + r_T \cdot P_{II} \leq \Theta_{\text{макс.доп.}} \quad (3.18)$$

де $\Theta_{ст}$ — температура напівпровідникової структури в стаціонарному режимі, °С;

$\Theta_{ос}$ — температура навколишнього середовища, 40 °С;

r_T — тепловий опір приладу й охолоджувача для обраних умов охолодження, °С/Вт;

P_{II} — потужність втрат у вентилі, Вт;

$\Theta_{\text{макс.доп.}}$ — максимально припустима температура напівпровідникової структури обраного вентиля, °С.

Визначимо втрати у вентилі:

$$P_{II} = U_0 \cdot I_a \cdot (1 + K_\phi \cdot I_a \cdot \frac{R_\phi}{U_0}) = 1,03 \cdot 13,26 \cdot (1 + 3 \cdot 13,26 \cdot \frac{4,6 \cdot 10^{-3}}{1,03}) = 16,35 \text{ Вт}, \quad (3.19)$$

де $U_0 = 1,03$ – гранична напруга вентиля, В;

$I_a = 13,26$ – середнє значення анодного струму вентиля, А;

$K_\phi = \sqrt{3}$ – коефіцієнт форми анодного струму вентиля;

$R_\phi = 4,6 \cdot 10^{-3}$ – диференціальний опір вентиля, Ом.

Охолоджувач вибираємо типу ПРО 231-80, у якого тепловий опір дорівнює

$$R_{thH} = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$$

Тепловий опір вентиля й охолоджувача із природним охолодженням визначається в такий спосіб:

$$r_m = r_1 + r_2 + r_3, \quad (3.20)$$

де r_1 – тепловий опір перехід-корпус приладу, $^\circ\text{C/Вт}$;

r_2 – тепловий опір корпус приладу – контактна поверхня охолоджувача, $^\circ\text{C/Вт}$;

r_3 – тепловий опір охолоджувач – навколишнє середовище, $^\circ\text{C/Вт}$.

Загальний тепловий опір дорівнює:

$$r_m = 0,5 + 0,2 + 0,85 = 1,55 \text{ } ^\circ\text{C/Вт} \quad (3.21)$$

Тоді температура структури в стаціонарному режимі:

$$\Theta_{ст} = 40 + 1,55 \cdot 16,35 = 65 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.22)$$

Максимально припустима температура структури наведена в довіднику й становить $\Theta_{\text{макс.доп.}} = 125 \text{ } ^\circ\text{C}$. Таким чином, порівнюючи розрахункову й узятую з довідника температуру доходимо висновку, що тепловий режим вентиля нам підходить.

3.7 Обмеження комутаційних перенапруг

При вимиканні силових діодів і тиристорів через обрив зворотного струму на індуктивності комутаційного контуру виникає ЕРС, що підсумується з комутуючої ЕРС. Ця ЕРС звичайно називається комутаційною перенапругою. Для обмеження перенапруги застосовуються захисні RC - кола, що включаються паралельно напівпровідниковим приладам.

Для розрахунку захисного кола необхідно знати амплітуду зворотного струму вентиля, що захищається, і індуктивність контуру комутації, що в основному визначається реактивній складовій опору КЗ анодного трансформатора:

$$L_k = \frac{2X_a}{\omega_c} = \frac{2 \cdot 0,089}{314} = 0,85 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (3.23)$$

Амплітуда зворотного струму вентиля залежить від величини наповненого заряду й швидкості зменшення анодного струму, що може бути обчислена по формулі:

$$\left(\frac{di}{dt} \right) = \frac{\sqrt{6} \cdot E_2}{L_k} = \frac{\sqrt{6} \cdot 220 \cdot 1,1}{0,85 \cdot 10^{-3}} = 69,7 \cdot 10^5 \text{ (А/с)} = 0,697 \text{ А/мкс}, \quad (3.24)$$

де $\frac{di}{dt}$ – швидкість зміни анодного струму;

$\sqrt{6}E_2$ – амплітуда комутуючої ЕРС;

L_k – індуктивність комутаційного струму вентиля.

Для знайденого значення швидкості зміни анодного струму по залежностях, наведених у довіднику, визначаємо величини заряду й часу зворотного відновлення.

Заряд зворотного відновлення:

$$Q_{rr} = 30 \cdot 10^{-6} \text{ мкКл.}$$

Час зворотного відновлення:

$$t_{rr} = 15 \cdot 10^{-6} \text{ мкс.}$$

Тоді амплітуда зворотного струму вентиля дорівнює:

$$I_{b \max} = \frac{2 \cdot Q_{rr}}{t_{rr}} = \frac{2 \cdot 30 \cdot 10^{-6}}{15 \cdot 10^{-6}} = 4 \text{ А.} \quad (3.25)$$

Обчислюємо опір резистора захисного кола, рівний хвильовому опору контура.

$$R_{\partial} = \rho = \frac{E_{k \max}}{I_{b \max}} = \frac{\sqrt{6} \cdot 220 \cdot 1,1}{4} = 147 \text{ Ом.} \quad (3.26)$$

Обчислюємо ємність захисного кола:

$$C_{\partial} = \frac{L_k}{\rho^2} = \frac{0,00085}{147^2} = 0,39 \cdot 10^{-7} \text{ Ф.} \quad (3.27)$$

Вибираємо значення: $R_{\partial} = 150 \text{ Ом}$, $C_{\partial} = 68 \text{ нФ}$.

Потужність, що розсіюється в резисторі захисного кола, визначається енергією, запасеної в елементах коливального контуру при включенні й вимиканні вентиля. Ця потужність обчислюється по формулі:

$$P_R = \left(3 \cdot \frac{C_{\partial} \cdot U_{b \max}^2}{2} + \frac{L_a \cdot I_{b \max}^2}{2} \right) \cdot f = \left(3 \cdot \frac{0,39 \cdot 10^{-7} \cdot 525^2}{2} + \frac{0,28 \cdot 10^{-3} \cdot 4^2}{2} \right) \cdot 50 = 0,92 \text{ Вт.} \quad (3.28)$$

Таким чином, вибираємо наступні елементи:

- резистор – МЛТ 2-0,125-270 Ом $\pm$ 10% ОЖО.467.081ТУ;
- конденсатор - КМ 68 нф-630 У ОЖО.462.141 ТУ.

3.8 Розрахунок індуктивності реактора, що згладжує

У більшості випадків змінна складова випрямленої напруги (пульсація), що діє на виході випрямляча, неприпустимо велика для споживачів. Фільтр, що включається

між виходом випрямляча й навантаженням, призначений для зменшення пульсації.

Найбільше широко застосовуються згладжувальні фільтри, що складаються з індуктивності і ємності (типу LC) або з опору і ємності (типу RC). Всі фільтри, що згладжують, характеризуються коефіцієнтом згладжування q , який можна представити як відношення амплітуди першої гармоніки пульсації на вході фільтра $U_{01\sim}$ до амплітуди першої гармоніки пульсації на виході першої ланки $U_{11\sim}$:

$$q = \frac{U_{01\sim}}{U_{11\sim}}.$$

До фільтрів, що згладжують, пред'являються також вимоги, пов'язані з конструктивним виконанням (маса, габарити, ККД і т.п.), а також експлуатаційними особливостями (вартість, надійність). Індуктивний фільтр (L -фільтр) застосовується для випрямлячів середньої й великої потужності, тому що дозволяє забезпечити безперервність струму в колі навантаження й сприятливий режим роботи випрямляча. Індуктивний фільтр (рис. 3.3) являє собою реактор, включений між схемою випрямлення й навантаженням. Напряга на виході випрямляча містить постійну складову U_d і змінну $U_{\sim}$. Зневажаючи зміною цих складових від навантаження, можна замінити ними напівпровідникову частину схеми випрямляча, тобто вважати, що на вході фільтра включені два послідовно з'єднаних джерела напруги: з постійної ЕРС U_d і змінною ЕРС $U_{\sim}$. Постійна ЕРС не робить впливу на пульсацію, а в якості змінної ЕРС можна розглядати тільки ЕРС основної гармоніки пульсації U_{1m} (першої гармоніки змінної складової), тому що вони переважно визначають коефіцієнт пульсації.

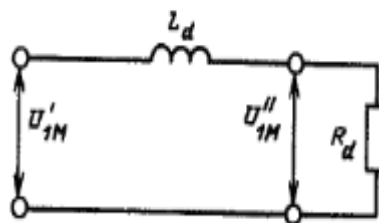


Рисунок 3.7 - Схема вихідного L -фільтра

Індуктивність дроселя, що згладжує, може визначатися як з умови забезпечення заданого коефіцієнта пульсацій у струмі навантаження, так і з умови забезпечення заданої ширини зони переривчастих струмів. При проектуванні випрямляча

необхідно перевірити обоє умови й вибрати більше значення індуктивності L_d . [14]

Оскільки амплітуда першої гармоніки пульсацій вихідної напруги випрямляча залежить від кута регулювання, необхідно визначити максимальне значення цього кута:

$$\cos \alpha_{\max} = \frac{U_{dH}}{2,34 \cdot U_{2\min} \cdot 1,2} = \frac{257}{2,34 \cdot 109,8} = 0,93 \quad (3.29)$$

$$\alpha_{\max} = \arccos 0,93 = 21^\circ.$$

де $U_{2\min}$ – мінімальна випрямлена напруга;

$\alpha_{\max}$ – максимальний кут регулювання.

Максимальне значення випрямленої напруги:

$$U_{d0\max} = 2,34 \cdot U_{2\max} = 2,34 \cdot \frac{U_{2ном}}{0,9} = 2,34 \cdot \frac{U_{2\min}}{0,9 \cdot 0,9} = 317,07 \text{ В}. \quad (3.30)$$

Амплітуда першої гармоніки пульсацій випрямленої напруги визначається співвідношенням:

$$U_{m(1)} = \frac{2 \cdot U_{d0\max} \cdot \cos \alpha_{\max}}{(qm)^2 - 1} \sqrt{1 + (qm)^2 \cdot tg^2 \alpha_{\max}} = \frac{2 \cdot 317,07 \cdot 0,93}{36 - 1} \sqrt{1 + 36 \cdot tg^2 21} = 42,3 \text{ В}, \quad (3.31)$$

де qm - пульсність схеми.

Коефіцієнт пульсацій випрямленого струму:

$$K_{\max} = K_0 \sqrt{1 + (qm)^2 \cdot tg^2 \alpha_{\max}} = \frac{2}{36 - 1} \cdot \sqrt{1 + 36 \cdot tg^2 21} = 0,14, \quad (3.32)$$

де $K_0 = 2/35$ – коефіцієнт пульсацій при $\alpha = 0$.

$$K_{\max} = \frac{I_{d(1)}}{I_{dH}} = 0,28 \Rightarrow I_{d(1)} = K_{\max} \cdot I_{dH} = 0,14 \cdot 39,8 = 5,572 \text{ A}, \quad (3.33)$$

де $I_{d(1)}$ – амплітуда першої гармоніки пульсацій випрямленого струму.

Необхідна сумарна індуктивність контуру випрямленого струму:

$$L_{d\Sigma} = \frac{U_{m(1)}}{q m \cdot \omega \cdot K_n \cdot I_{dH}} = \frac{42,3}{6 \cdot 314 \cdot 5,572} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}, \quad (3.34)$$

звідси індуктивність дроселя, що згладжує:

$$L_d = L_{d\Sigma} - 2 \cdot L_a = 4 \cdot 10^{-3} - 2,35 \cdot 10^{-3} = 1,65 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}. \quad (3.35)$$

3.9 Конструктивний розрахунок реактора, що згладжує

Для одержання досить гарної фільтрації, як було показано вище, дросель фільтра повинен мати достатню індуктивність. Таку індуктивність можна одержати, лише застосовуючи реактор із сердечником з феромагнітного матеріалу. Практично всі реактори фільтрів виконуються із сердечниками із трансформаторної сталі й по своїй конструкції мало відрізняються від трансформаторів.

Реактор, подібно трансформатору, складається із сердечника, обмотки, каркаса й деталей, що скріплюють сердечник.

Для малих реакторів найчастіше застосовуються броньові сердечники таких же типів, що й для трансформаторів, але менших розмірів.

Внаслідок того, що через реактор фільтра протікає значна постійна складова випрямленого струму, сердечник реактора сильно намагнічується постійним магнітним потоком. При цьому, як відомо з електротехніки, набагато зменшується магнітна проникність матеріалу сердечника. Для зменшення постійного підмагнічування сердечника в ньому застосовується повітряний зазор або зазор якого-небудь іншого немагнітного матеріалу. Для кожного конкретного випадку

існує найвигідніша довжина зазору в сердечнику, при якій реактор має найбільшу індуктивність.

При конструктивному розрахунку реактора необхідно визначити наступні його дані:

- а) тип і розміри сердечника;
- б) кількість витків обмотки ω ;
- в) діаметр дроту d у мм;
- г) довжину повітряного зазору l_z у мм.

Заданими величинами (відомими з електричного розрахунку фільтра) при цьому є:

- а) індуктивність реактора L у Гн;
- б) струм, що протікає через реактор (випрямлений струм) I_d , в А.

Розрахунок реактора, подібно розрахунку трансформатора, доцільно почати з вибору сердечника.

Вибір розмірів сердечника реактору варто робити, виходячи із заданої величини $L_d \cdot I_d^2$, що характеризує магнітну енергію, яка запасасться в сердечнику. Чим більше величина $L_d \cdot I_d^2$, тим більший об'єм повинен мати сердечник дроселя.

Для визначення мінімальної величини об'єму сердечника реактора V можна користуватися наступною наближеною формулою:

$$V = L_d \cdot I_d^2 = 1,65 \cdot 10^{-3} \cdot 39,8^2 = 2,61 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3, \quad (3.36)$$

Якщо об'єм сердечника взяти багато менше величини, знайденої з формули (3.32), то буде мати місце сильне магнітне насичення сердечника. Це веде до значного зменшення магнітної проникності матеріалу сердечника й збільшенню витрати дроту на виготовлення даного реактора. [14]

По довіднику основних габаритів сердечників [11] вибираємо тип сердечника, що задовольняє вираженню (3.32): стрижневий стрічковий магнітопровід типу ПЛ6,5х12,5х8, для якого $V_{см} = 2,69 \text{ см}^3$; $S_{см} = 0,73 \text{ см}^2$; $l_{ср.м} = 3,69 \text{ см}$. Далі переходимо до розрахунку обмотки реактора.

Якщо реактор працює при слабкому підмагнічуванні постійним струмом, то

зазор у його сердечнику не робиться. Якщо ж реактор працює при значному постійному струмі, коли необхідно робити в його сердечнику зазор, то число витків обчислюємо по формулі:

$$w = 10 \cdot \frac{L_d \cdot I_d}{S_{cm}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + 3000 \cdot \frac{V_{cm}}{V}} \right) =$$

$$= 10 \cdot \frac{1,65 \cdot 10^{-3} \cdot 39,8}{0,73} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + 3000 \cdot \frac{2,69}{2,61}} \right) = 50,9 \approx 51 \text{ виток}, \quad (3.37)$$

де S_{cm} – активна площа перетину магнітопроводу;

V_{cm} – активний обсяг магнітопроводу.

Найвигідніша довжина зазору сердечника може бути знайдена з наступного наближеного співвідношення:

$$l_z = \frac{w \cdot I_d}{8} \cdot 10^{-5} = 0,00358 \text{ м} = 3,58 \text{ мм}. \quad (3.38)$$

Діаметр проведення обмотки реактора знаходять по заданому випрямленому струмі, виходячи із припустимої щільності струму. При щільності струму $j = 2,5 \text{ А/мм}$ необхідний діаметр проводів знаходимо по формулі:

$$d = 0,7 \cdot \sqrt{I_d} = 0,7 \cdot \sqrt{39,8} = 4,4 \text{ (мм)} = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (3.39)$$

Визначаємо повну масу реактора по формулі:

$$M = m_{\text{магн}} + m_{\text{провода}}. \quad (3.40)$$

Маса проводу $m_{\text{провода}}$ визначається по формулі:

$$m_{\text{провода}} = \rho \cdot V_{\text{провода}} = \rho \cdot S_{\text{пров}} \cdot l_{\text{пров}}, \quad (3.41)$$

де $\rho = 8600 \text{ кг/м}^3$ – щільність міді;

$S_{\text{пров}}$ – площа перетину дроту;

$l_{\text{пров}}$ – повна довжина дроту.

Площа перетину дроту визначаємо по формулі:

$$S_{\text{пров}} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = 3,14 \cdot \frac{4,4 \cdot 10^{-3}}{4} = 0,152 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (3.42)$$

Повна довжина дроту визначається зі співвідношення:

$$l_{\text{пров}} = l_{\text{ср.м}} \cdot w = 0,0369 \cdot 51 = 1,88 \text{ м.} \quad (3.43)$$

де $l_{\text{ср.м}}$ – середня довжина витка.

Тоді повна маса реактора буде дорівнює:

$$M = 0,028 + 8600 \cdot 0,152 \cdot 10^{-4} \cdot 1,88 = 0,27 \text{ кг} = 270 \text{ г.}$$

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ СНП ІМІТАТОРА ВТ

4.1 Побудова сімейства зовнішніх характеристик СНП

У процесі проектування СНП автоматизованого електропривода імітатора необхідно провести його моделювання. Для моделювання розрахованої схеми будемо використовувати програму схемотехнічного проектування MICROCAP 7.1 (рис. 4.2). Результати моделювання представлені на рисунках 4.4- 4.7.

При моделюванні силових напівпровідникових вентилів (тиристорів) будемо використовувати їхні макромоделі. Навантаженням трифазного мостового випрямляча є якірне коло двигуна постійного струму, тому така робота випрямляча називається роботою на проти-ЕРС. У цьому випадку, якірне коло двигуна постійного струму містить у схемі заміщення не тільки RL -елементи якірної обмотки, але й нелінійне залежне джерело напруги NFV , що описується функціональною залежністю:

$$\begin{aligned} E &= \kappa_E \cdot \omega, \\ E &= U_{\alpha} - I_{\alpha} \cdot R_{\alpha}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Завданням моделювання є розгляд впливу значення індуктивності в колі навантаження L_d на зовнішню характеристику випрямляча. Зовнішньою характеристикою називається залежність випрямленої напруги від середнього значення струму навантаження, тобто $U_d = f(I_d)$ при $\alpha = const$. Зовнішня характеристика визначається внутрішнім опором випрямляча, що приводить до зниження випрямленої напруги з ростом навантаження. Зниження напруги обумовлене активним опором схеми ΔU_R , спаданням напруги в тиристорах ΔU_{VS} і індуктивним опором ΔU_x , що проявляється при процесах комутації:

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha - \Delta U_R - \Delta U_{VS} - \Delta U_x, \quad (4.2)$$

де

$$\Delta U_x = \frac{X_a \cdot I_d}{\frac{2\pi}{q \cdot m}}. \quad (4.3)$$

Згідно (4.2) вихідна напруга випрямляча знижується в міру збільшення струму навантаження I_d за рахунок внутрішнього спадання напруги.

Графіки результуючих зовнішніх характеристик випрямляча, навантаженого на проти-ЕРС, наведені на рис. 4.1. Показовий крутий спад характеристик в області переривчастого випрямленого струму. Це обумовлено різкою залежністю тривалості протікання струму λ від зміни проти-ЕРС і обмеженням величини імпульсу струму реактансами X_a та X_d . У режимі безперервного струму це обмеження визначається процесом комутації, у якому бере участь тільки реактанс X_a .

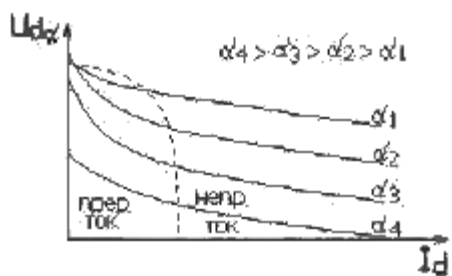


Рисунок 4.1 - Сімейство зовнішніх характеристик

При кінцевому значенні індуктивності в ланцюзі навантаження може виникнути режим переривчастого випрямленого струму. У цьому режимі струм провідного вентиля спадає до нуля раніше, ніж імпульс керування надходить на наступний вентиль і у випрямленому струмі утвориться нульова пауза. Переривчастий випрямлений струм приводить до спотворення всіх основних характеристик випрямляча й, як правило, є небажаним. Для скорочення області його існування необхідно збільшити постійну часу навантаження за рахунок росту індуктивності фільтра L_d .

Слід зазначити, що інтервали переривчастих струмів у керованих випрямлячах великої потужності при руховому навантаженні характеризуються малими величинами середнього значення випрямленого струму (відсотки або частки відсотка номінального значення).

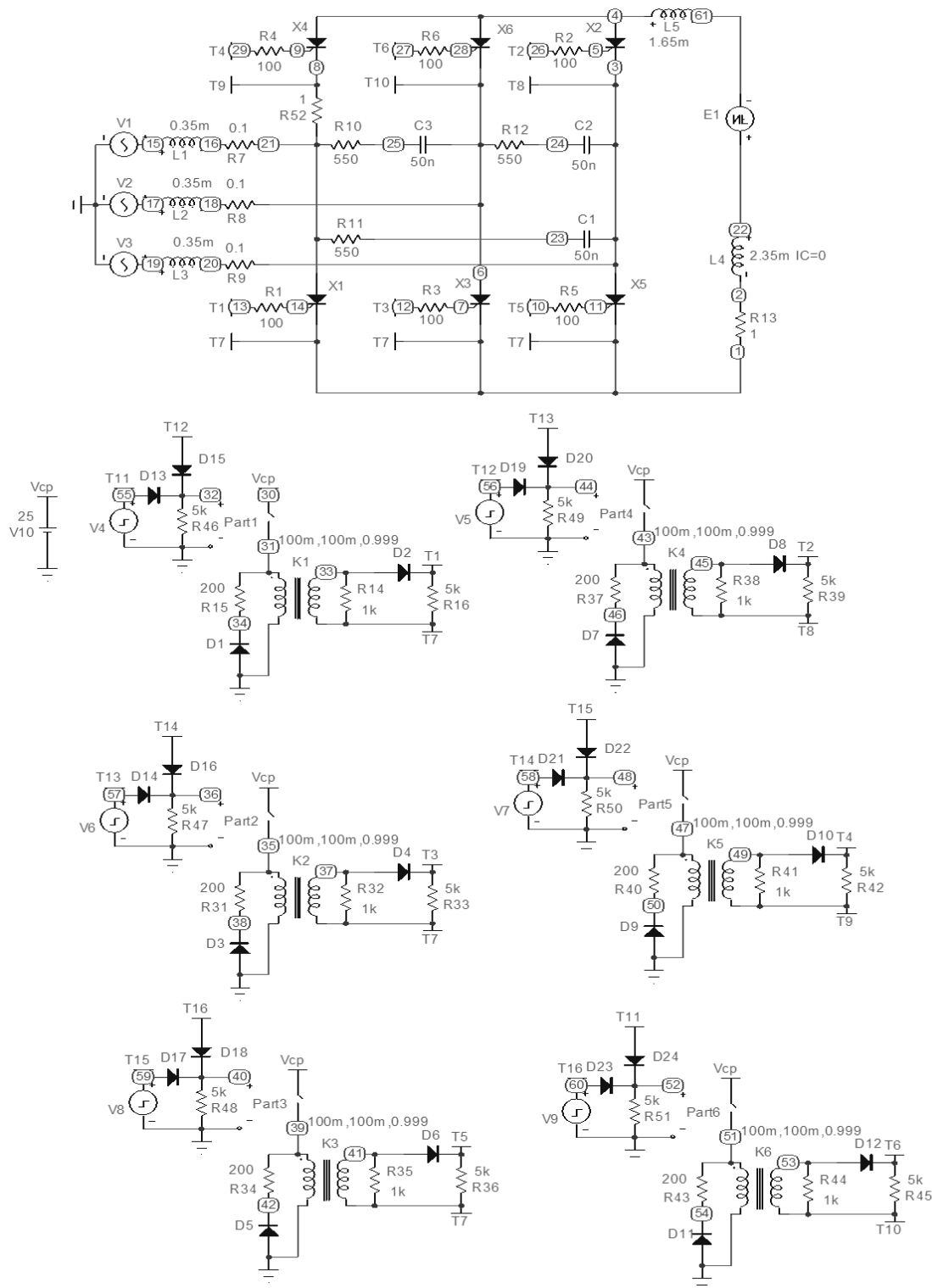


Рисунок 4.2 - Модель СНП імітатора ВТ.

Після того, як побудована принципова схема СНП у програмі Micro-Cap 7, переходимо до розрахунку характеристик, вибираючи в меню Analysis вид аналізу Transient (Alt+1) – розрахунок перехідних процесів (рис. 4.3). Для побудови зовнішніх характеристик необхідно зняти графіки перехідних процесів випрямленої напруги U_d і струму I_d , змінюючи значення протитиво-ЕРС (рис. 4.4).

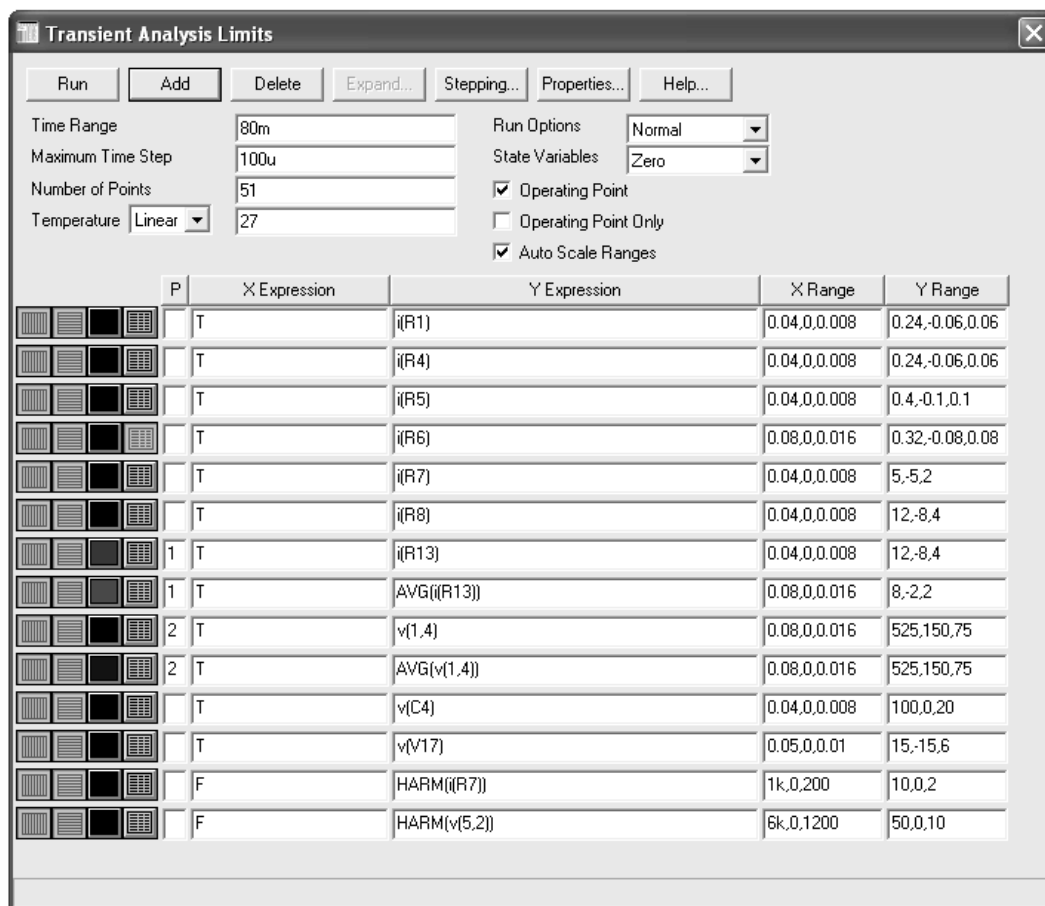


Рисунок 4.3 - Вікно завдання параметрів для аналізу перехідних процесів

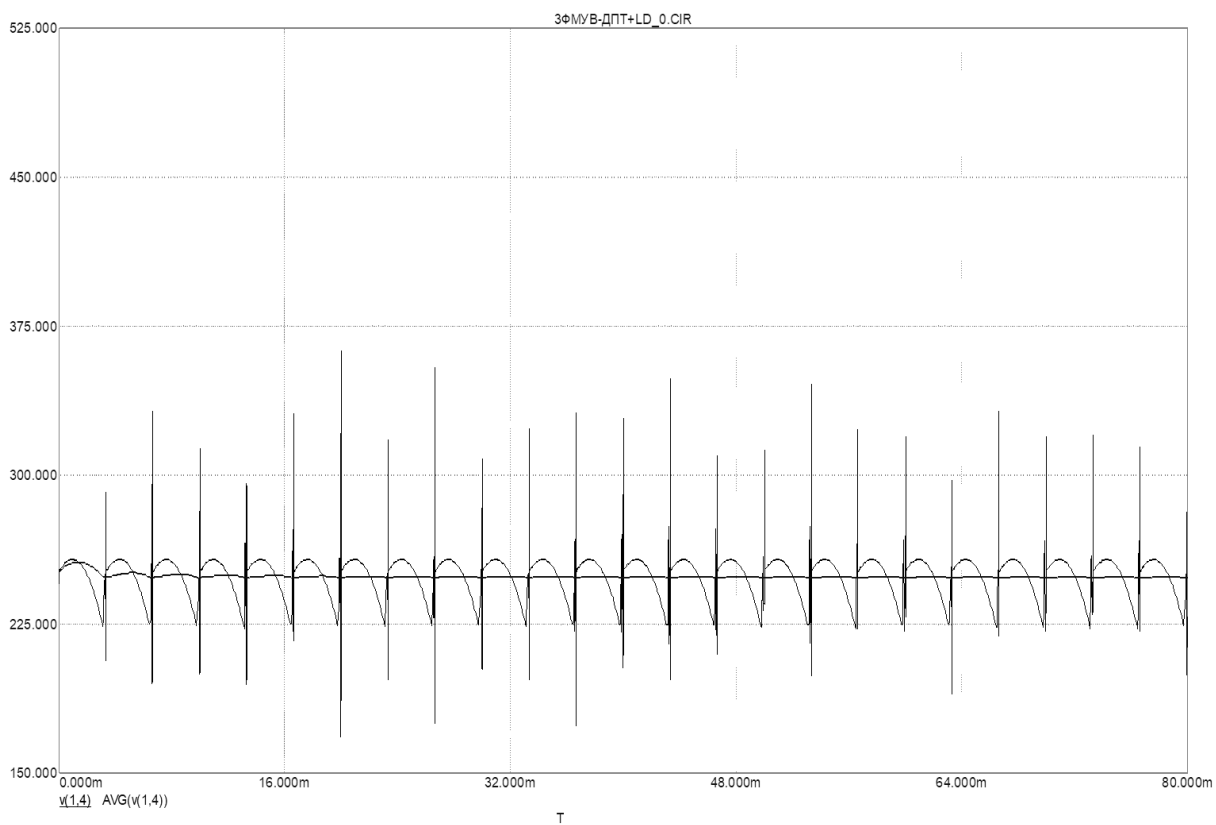
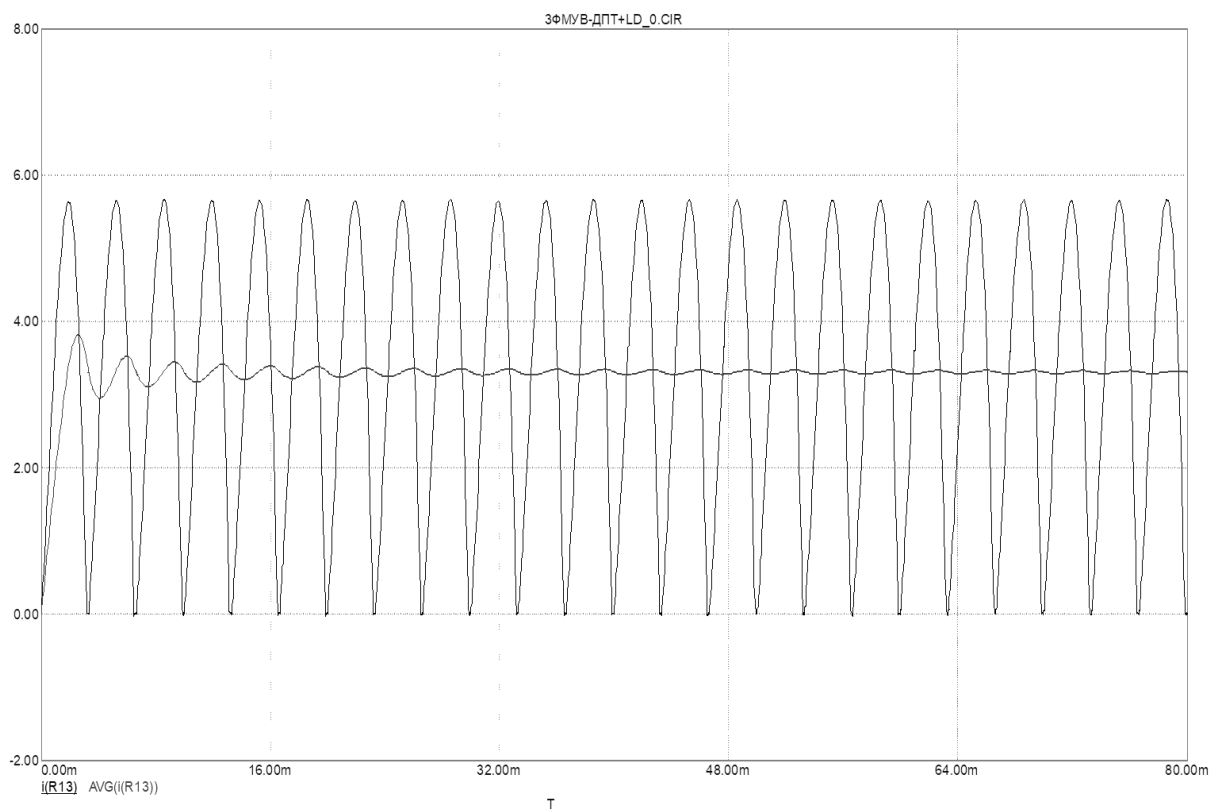


Рисунок 4.4 – Графіки перехідних процесів U_d і I_d

Для побудови сімейства зовнішніх характеристик при певних кутах керування α

необхідно у вікні параметрів джерел $V1$, $V2$, $V3$ (рис. 3.2) змінювати значення початкової фази φ_N .

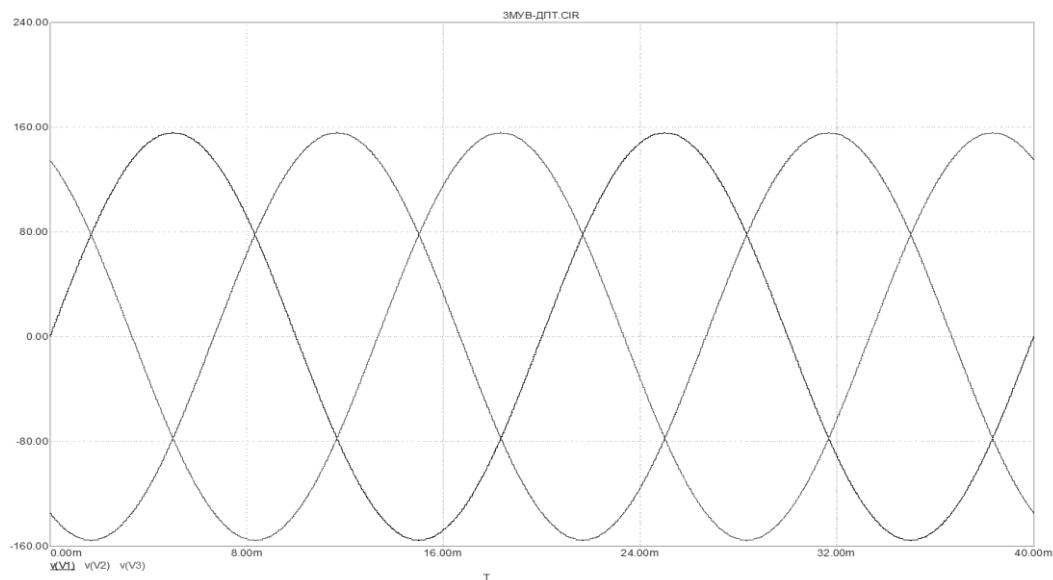


Рисунок 4.5 - Діаграми мережевої напруги $V1$, $V2$, $V3$ при $\alpha = 0$

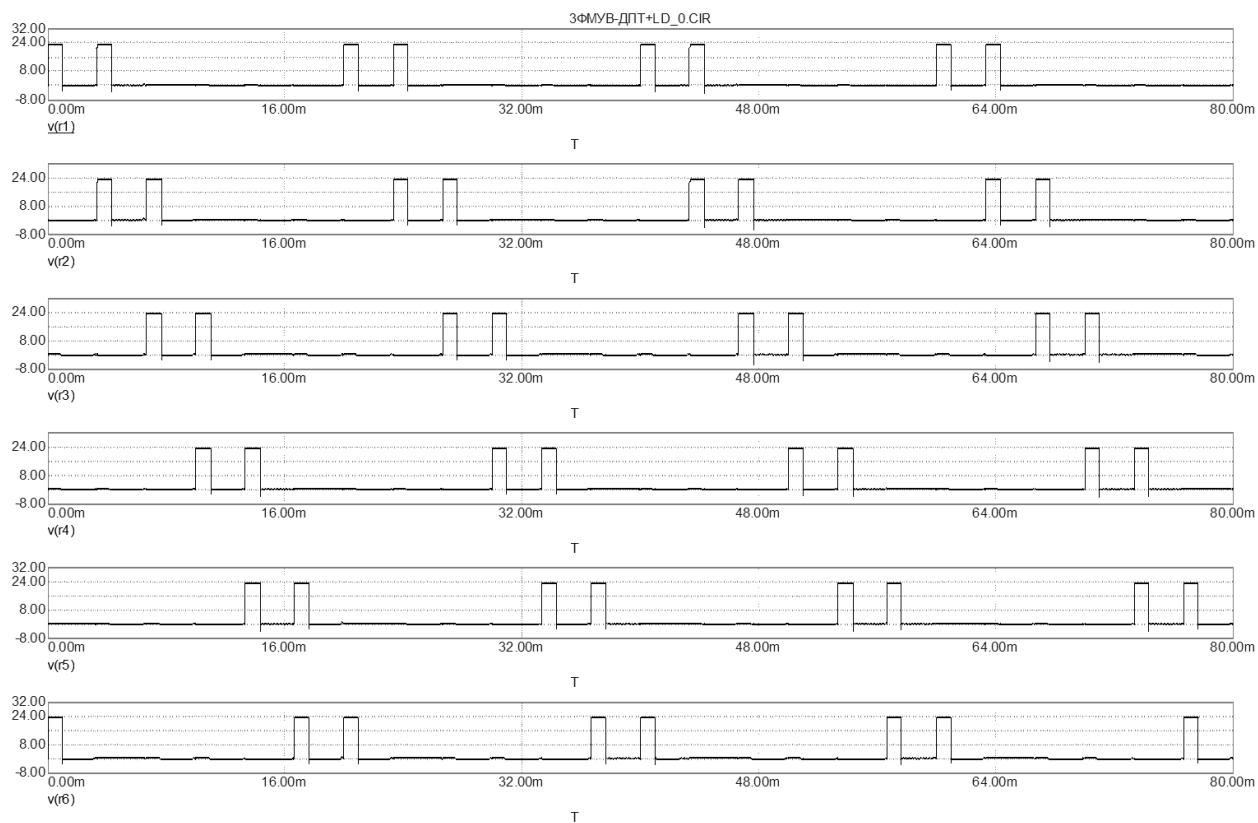


Рисунок 4.6 - Діаграми здвоєних керуючих імпульсів

Результати моделювання СНП представляємо у вигляді таблиці.

Таблиця 4.1 – Залежність $U_d = f(I_d)$

α , град.	I_d , А	U_d , В	α , град.	I_d , А	U_d , В
21 ^{про}	0	255	60 ^{про}	0,4	255,18
	6,55	252,43		1,92	241,83
	8,5	251,71		3,46	233,58
	9,82	251,25		5,39	225,85
	16,44	248,84		8	218,13
	23,14	246,64		14,72	215,98
	29,92	244,51		28,13	211,4
	36,75	242,41		34,85	209,36
30 ^{про}	1	256	75 ^{про}	0,0278	250
	3,36	253,78		0,69	230,55
	6,65	252,6		1,44	220,66
	9,98	251,42		2,5	212,22
	16,72	249,27		5,47	195,9
	23,5	247,11		7,39	187,8
	30,3	244,97		9,6	180,6
	37,125	242,86		13,4	175,93
45 ^{про}			90 ^{про}	0,0254	220
	1,13	256,33		0,434	200
	2	252,25		0,9	190,57
	4,96	245,15		2,5	172
	11,65	242,94		3,62	163,32
	18,36	240,72		5	154,9
	25	238,47		8,8	139,4
	31,82	236,29		10,5	131,55
	38,56	234,15		11	129,6
				12,4	125

За допомогою програми для роботи з таблицями Microsoft Excel будемо сімейство зовнішніх характеристик моделі СНП (рис. 4.7).

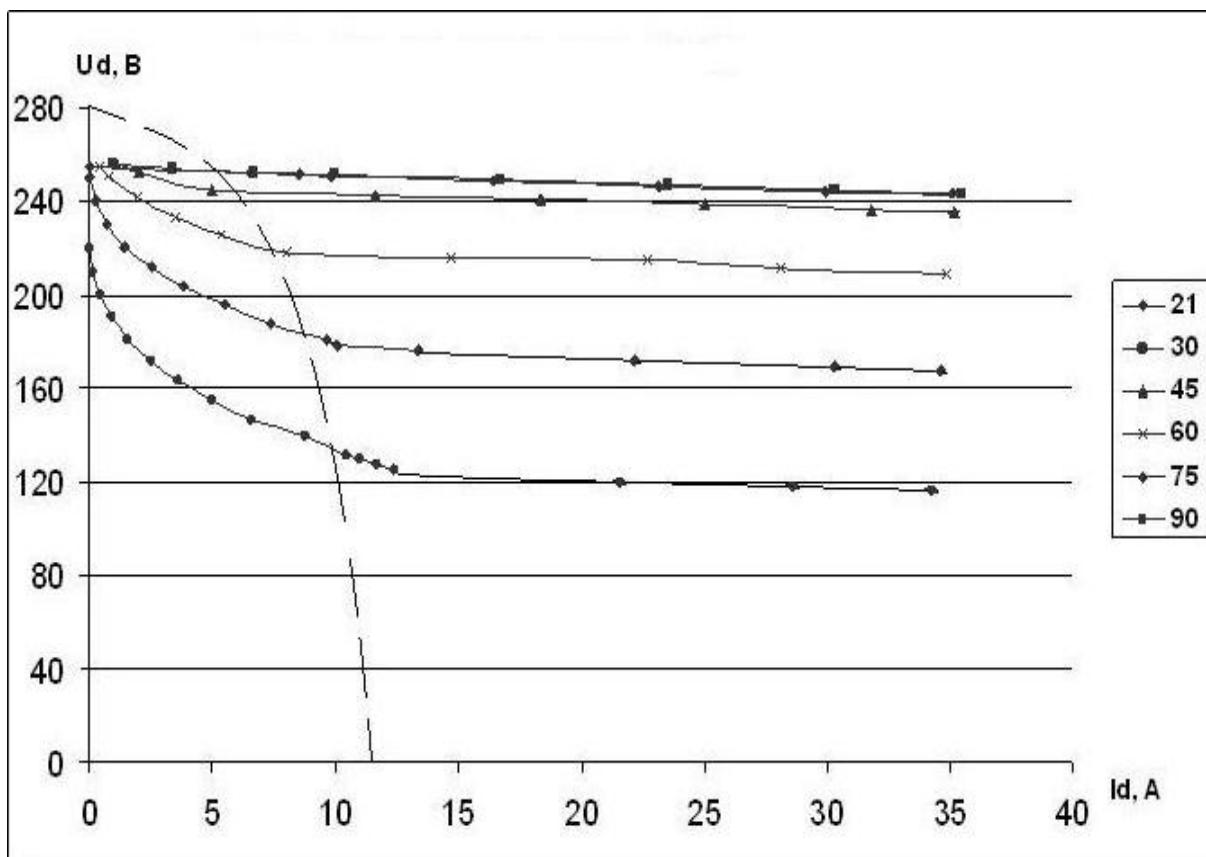


Рисунок 4.7 – Сімейство зовнішніх характеристик СПП при $L_d = 1,65 \text{ мГн}$

4.2 Побудова оптимізованої моделі СНП із вибором оптимальної індуктивності реактора

При рішенні реальних завдань об'єкт звичайно характеризується не одним, а декількома показниками (критеріями) функціонування. При оптимізації вимоги до них можуть бути суперечливими, тобто поліпшуючи один показник, неминуче погіршується частина інших. Тому виникає завдання визначення деякого компромісного рішення, рівною мірою задовольняючого всім вимогам. Як правило, результати по кожному окремому показнику якості будуть гірше, ніж у випадку однокритеріальної оптимізації по цьому параметру. [21]

Критерії - це показники, по яких порівнюють оптимальне значення індуктивності. Як критерії порівняння вибираємо:

- 1) швидкодія системи τ , що визначається за формулою:

$$\tau = \frac{L_{\Sigma}}{R_{я}} = \frac{L_d + L_{я}}{R_{я}}, \quad (4.4)$$

де $L_{я}$ – індуктивність обмотки якоря двигуна;

$R_{я}$ – опір обмоток якоря двигуна;

2) граничний переривчастий струм $I_{dcp.}$, значення якого визначається за допомогою тривалості протікання випрямленого струму λ :

$$\lambda = \frac{2\pi}{q \cdot m} \quad (4.5)$$

3) маса згладжуючого реактора, що визначається за методикою, описаної в п. 2

Далі необхідно визначити значимість критеріїв за допомогою вагових коефіцієнтів. Оскільки завдання визначення вагових коефіцієнтів значимості є дуже складною, використовуємо суб'єктивний вибір: для 1-го критерію ваговий коефіцієнт $a = 0,6$; для 2-го критерію – $a = 0,3$; для 2-го критерію – $a = 0,1$.

Тоді багатокритеріальний оптимум обчислюється по формулі:

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{a_i \cdot Q_i}{Q_{\max}}, \quad (4.6)$$

де a_i – ваговий коефіцієнт;

Q_i – значення локального критерію;

$Q_{\max}$ – максимальне значення критерію.

Багатокритеріальний оптимум Q вибираємо за мінімальним значенням.

Алгоритм по знаходженню багатокритеріального оптимуму представлений на рис.

4.8. По даному алгоритму існує програма, що була написана мовою “Pascal”.

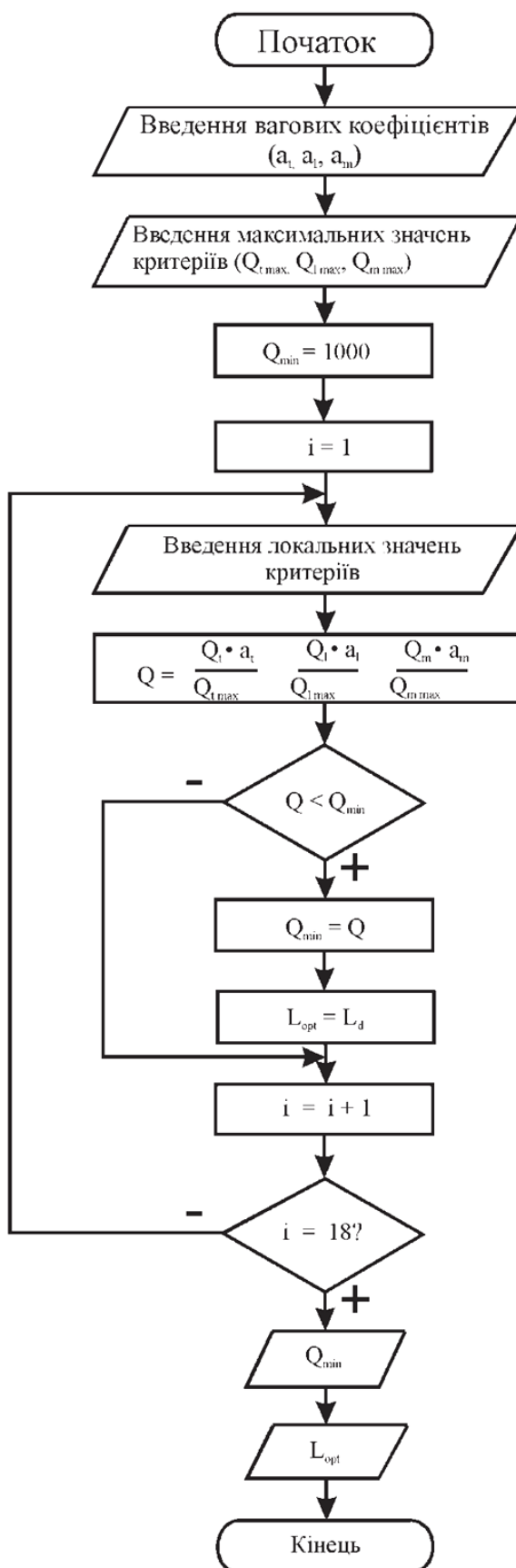
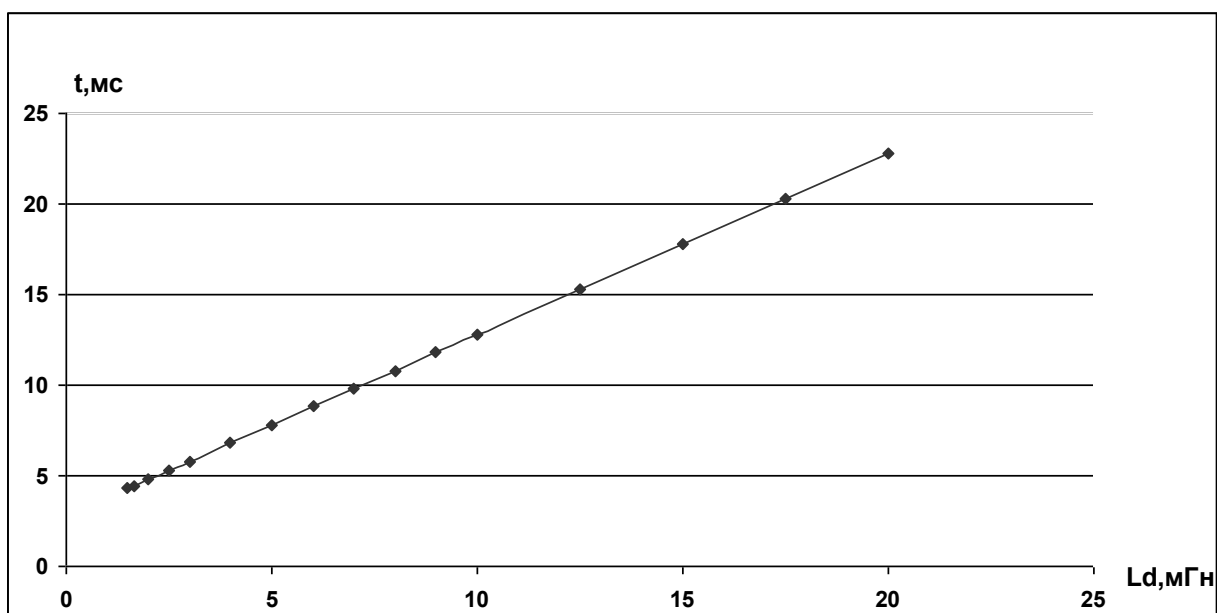


Рисунок 4.8 - Алгоритм оптимізації

Таблиця 4.2 - Результати багатокритеріальної оптимізації

Ld, мГн	Id, А	τ , мс	m, г	Q(τ)	Q(I _{max})	Q(m)	Q Σ
0,5	4	2,85	257,982	0,07651	0,3	0,007485	0,383995
1	3,67	3,35	361,1846	0,089933	0,27525	0,010479	0,375662
1,5	3,38	3,85	264	0,103356	0,2535	0,00766	0,364515
1,65	3,31	4	270	0,107383	0,24825	0,007834	0,363466
2	3,14	4,35	441	0,116779	0,2355	0,012795	0,365074
2,5	2,93	4,85	726	0,130201	0,21975	0,021064	0,371015
3	2,75	5,35	694	0,143624	0,20625	0,020135	0,37001
4	2,44	6,35	1031,038	0,17047	0,183	0,029914	0,383384
5	2,2	7,35	937,6657	0,197315	0,165	0,027205	0,38952
6	2	8,35	1192,461	0,224161	0,15	0,034598	0,408759
7	1,83	9,35	2275,516	0,251007	0,13725	0,066021	0,454278
8	1,68	10,35	2768,385	0,277852	0,126	0,080321	0,484173
9	1,56	11,35	1412,589	0,304698	0,117	0,040984	0,462682
10	1,46	12,35	1690,421	0,331544	0,1095	0,049045	0,490089
12,5	1,24	14,85	1869,887	0,398658	0,093	0,054252	0,54591
15	1,14	17,35	3446,665	0,465772	0,0855	0,1	0,651272
17,5	1,08	19,85	2799,638	0,532886	0,081	0,081227	0,695113
20	1,02	22,35	2927,753	0,6	0,0765	0,084945	0,761445

Рисунок 4.9 – Залежність швидкодії від індуктивності $\tau = f(L_d)$

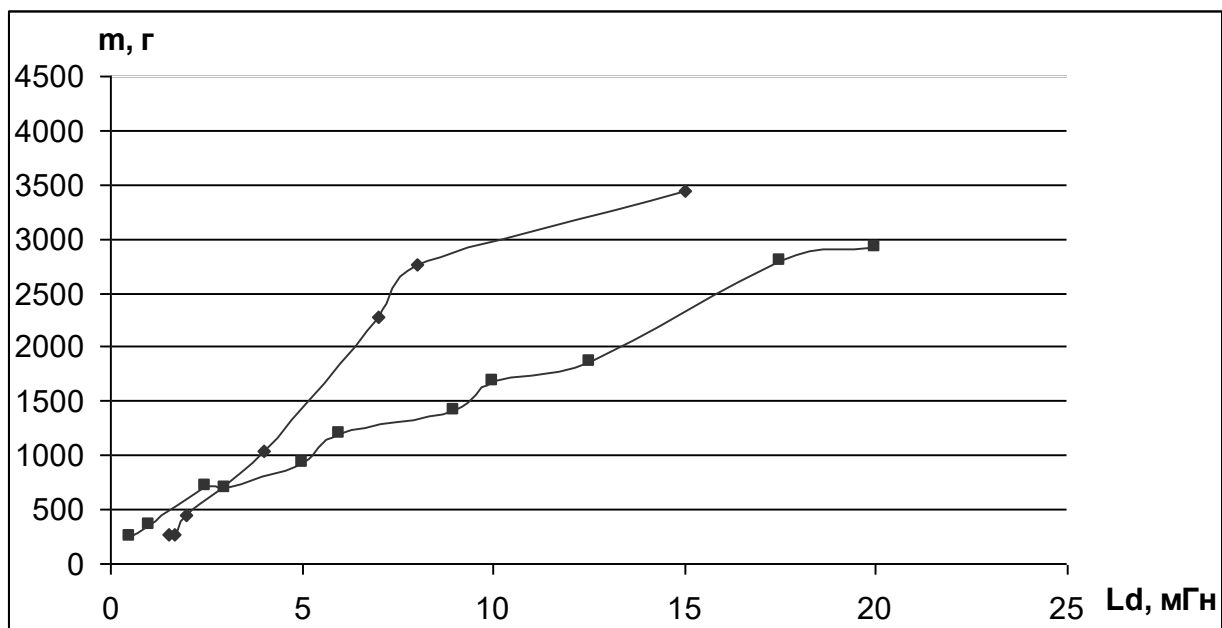


Рисунок 4.10 – Залежність маси від індуктивності $m = f(L_d)$

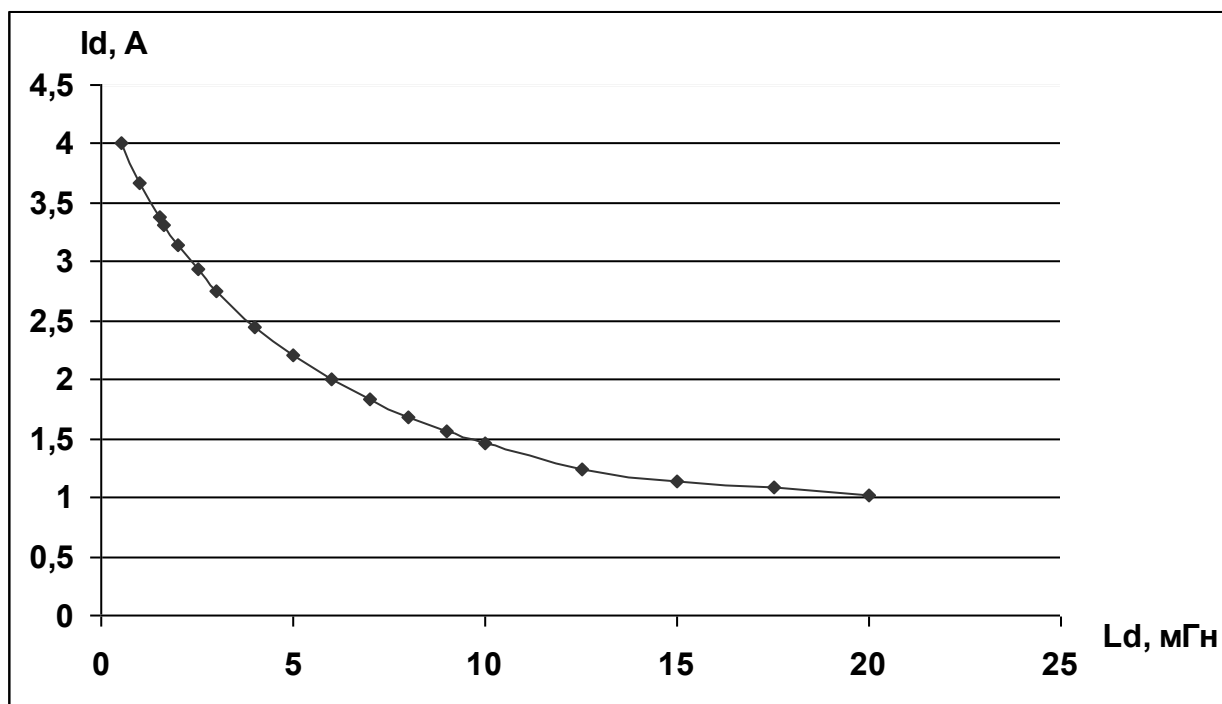


Рисунок 4.11 – Залежність струму від індуктивності $I_d = f(L_d)$



Рисунок 4.12 - Графік для визначення оптимального значення індуктивності

Таким чином, оптимальне значення індуктивності буде визначатися при мінімальному значенні оптимуму, рівне $Q_{min} = 0,36$: $L_{d\ opt.} = 2$ мГн. Даній індуктивності відповідає реактор зі стрижневим стрічковим магнітопроводом типу ПЛ6,5х12,5х16 з такими розрахунковими параметрами:

- $V_{cm} = 3,52$ см³ – активний об'єм магнітопроводу;
 - $S_{cm} = 0,73$ см² – активна площа перетину магнітопроводу;
 - $S_{ок} = 1,28$ см² – площа вікна;
 - $l_{ср.м} = 3,69$ см – середня довжина витка;
 - $m = 37$ г - маса магнітопроводу
- і повною масою M , рівної 441 г.

Значення оптимізованої індуктивності не відповідає значенню розрахованої, тому що критерії та вагові коефіцієнти обиралися суб'єктивно.

4.3 Планування експерименту

1. Випробування повинні проводитися в нормальних кліматичних умовах за ДСТ 15150 при номінальній напрузі мережі, якщо в методах контролю не зазначені інші умови.

2. Контрольно-вимірювальні прилади й інструменти, застосовувані при вимірах і випробуваннях, повинні бути повірені в строки й у порядку, установленому ДСТУ 2708 і забезпечувати контроль параметрів із заданою точністю.

Не допускається проведення випробувань на нетестованому устаткуванні й засобах вимірів, строк обов'язкових перевірок яких минув. Випробувальне устаткування повинне бути атестоване за ДСТ 24555.

3. При зовнішньому огляді й перевірці відповідності експериментальної установки комплекту документації варто перевірити:

- зовнішній вигляд стенда, у тому числі чистоту поверхонь, якість захисних покриттів, пайки; упакування на відповідність вимогам конструкторської документації;

- якість електричних контактних з'єднань повинне перевірятися щупом класу точності II, товщиною 0,03 мм. Перевірці підлягають електричні контактні з'єднання проводів постійного і змінного струмів;

- правильність збірки й монтажу;

- відповідність деталей і збірочних одиниць перетворювача збірочним кресленням і електричним схемам.

Відповідність електричним схемам повинне перевірятися будь-яким методом, що дозволяє встановити наявність всіх необхідних і відсутність зайвих електричних зв'язків;

- наявність і якість написів і маркування за ДСТ 18620.

Зовнішній вигляд, комплектність і монтаж повинні бути перевірені візуально.

4. Перевірка ступеня захисту оболонки корпусу експериментальної установки проводиться за методикою ДЕРЖСТАНДАРТ 14254.

5. Вимір опору ізоляції силових струмоведучих ланцюгів ланки постійного і

змінного струмів відносно корпусу повинне проводитися між закороченими між собою фазами вихідних виводів і корпусом перетворювача мегаомметром на 2500 В класу точності 1,0.

4.4 Опис експериментального стенда

Експериментальний стенд складається з: силового блоку привода постійного струму, системи керування, ДПС і синхронного генератора (СГ) (рис. 4.13).

Керування режимом роботи імітатора здійснюється за допомогою поста ручного керування.

ДПС і СГ установлені на масивній металевій платформі й з'єднані спеціальною муфтою безпосередньо вал до вала. Таким чином, обертання ДПС передається безпосередньо (без редуктора) на вал генератора.

Всі вузли стенда, крім платформи з електричними машинами, розміщені на металевому каркасі.

Швидкість обертання ДПС регулюється зміною напруги на якорі за допомогою керованого випрямляча (КВ). Контроль швидкості обертання ДПС здійснюється за допомогою датчика швидкості (ДШ). Контроль струму ланцюга якоря здійснюється за допомогою датчика струму (ДС).

Для захисту від струмів короткого замикання всі ланцюги імітатора включені в трифазну мережу 220/380 В через автоматичний вимикач *QF1*.

Синхронний генератор в експериментальному стенді виконує функцію навантаження двигуна. Живлення статора синхронного генератора з фазним ротором здійснюється за допомогою блока живлення (БЖ).

Ротор СГ підключений до входу некерованого випрямляча (НВ) через вимірювальний комплект К505, для вимірів електричних параметрів на затискачах ротора. Випрямлений струм на виході некерованого випрямляча згладжується реактором *L1*. Також до виходу некерованого випрямляча послідовно реактору підключена навантаження, представлене резистором R_n .

Таблиця 4.3 – Залежність $U_d = f(I_d)$

α , град.	I_d , А	U_d , В	α , град.	I_d , А	U_d , В
5 ^{про}	8	150	95 ^{про}	6	140
	8,5	146		6,5	135
	9	142		7	130
	10	141		7,5	125
	11	137		9	120
	12	135		10	115
	12,5	132		11	105
	13	130		12,5	100

Для перевірки адекватності моделі та зворотнього оптимізованого значення індуктивності необхідно провести порівняння сімейства зовнішніх характеристик моделювання й чисельного експерименту (рис. 4.15).

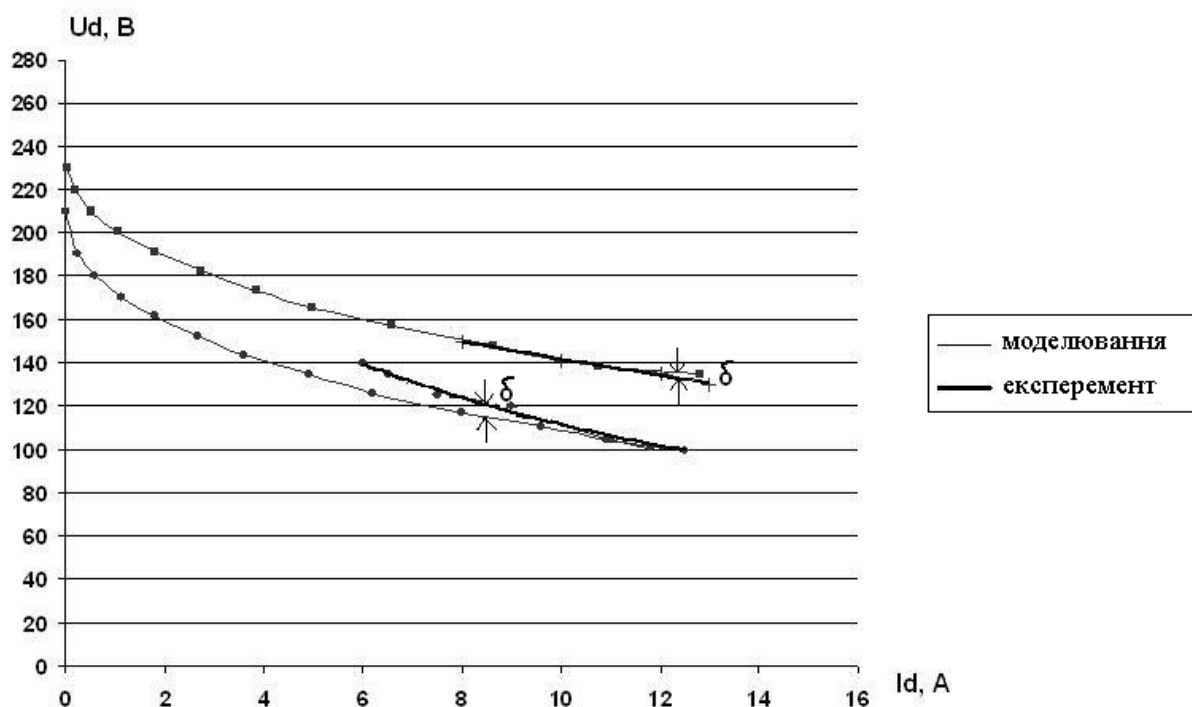


Рисунок 4.15 – Сімейство зовнішніх характеристик СПП розрахунку й експерименту при оптимізованій індуктивності $L_d = 2$ мГн

Після порівняння зовнішніх характеристик обчислюємо відносну похибку δ :

$$\delta_{85} = \left| \frac{U_{расч} - U_{эсп}}{U_{расч}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{148 - 150}{148} \right| \cdot 100\% = 1,35\%;$$

$$\delta_{95} = \left| \frac{U_{расч} - U_{эсп}}{U_{расч}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{117 - 120}{117} \right| \cdot 100\% = 2,5\%.$$

РОЗДІЛ 5

ЕЛЕКТРОБЕЗПЕЧНІСТЬ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Основні вимоги до безпеки електроустаткування викладені в ДЕРЖСТАНДАРТ 12.2.007.0-75 системи стандартів безпеки праці.

Стандарт установлює загальні вимоги безпеки конструкції виробів, тобто вимоги безпеки, що запобігають або зменшують до припустимого рівня впливи на людину: електричного струму, електричної іскри й дуги, що рухаються частин виробу, частин, що нагріваються до високих температур, небезпечних і шкідливих матеріалів, використовуваних у конструкції виробу, а також небезпечних і шкідливих речовин, що виділяються при його експлуатації, шуму, ультразвуку й вібрації, електромагнітних полів і теплового, оптичного й рентгенівського випромінювання. [19]

5.1 Розрахунок заземлення

При ушкодженні ізоляції електроустановки, її корпус і інші конструктивні елементи можуть виявитися під напругою. Якщо людина доторкнеться до такого ушкодженого встаткування, через нього пройде струм замикання на землю, що може бути небезпечним для життя.

Для захисту людини при дотику до металевих частин електроустановки, випадково опинившимися під напругою, застосовують захисне заземлення - навмисне з'єднання корпусу або інших металевих конструкцій установки із землею. Призначення захисного заземлення - створення між корпусом електричного пристрою й землею електричного з'єднання з малим опором.

При дотику людини до заземленого встаткування, опинившегося під напругою, через його тіло пройде струм малої величини, безпечний для організму. Основний струм замикання на землю піде по заземлюючому пристрої. Заземлюючий пристрій - сукупність заземлителя й заземлюючих провідників. Заземлитель - металевий

провідник, що перебуває в безпосередньому зіткненні із землею. Заземлюючі провідники з'єднують частини електроустановки із заземлювачем. Опір заземлюючого пристрою в основному визначається опором розтіканню струму із заземлювача в ґрунт.

Для заземлення використовують природні й штучні заземлювачі. Природні заземлювачі - арматури залізобетонних споруджень, фундаменти будинків, трубопроводи й інші металеві конструкції, що мають надійний контакт із землею. У якості штучних заземлювачів найчастіше використовують вертикально заглиблені сталеві труби, стрижні, куточки, з'єднані поверху сталеві горизонтальною смугою.

Опір заземлюючого пристрою, до якого приєднані нейтралі трансформаторів або виводи джерел однофазного струму, у будь-який час року повинне бути не більше 4 Ом відповідно при лінійній напрузі 380 В джерела трифазного струму.

Опір розтіканню струму не повинне перевищувати нормативної величини. Для електроустановок напругою до 1000 В нормативне значення становить 4 Ом , а якщо приєднана до мережі потужність не перевищує 100 кВа - 10 Ом .

Монтажна ділянка по складанню силового блоку привода постійного струму перебуває на першому поверсі двоповерхового окремо розташованого цегельного будинку розміром $20 \times 10\text{ м}$. Потужність струму, споживана ділянкою, перевищує 100 кВа й тому нормативна величина опору заземлювача R_n не повинна перевищувати 4 Ом . Заземлювач передбачається виконати зі сталевих вертикальних стрижневих електродів довжиною $l_e = 1,5\text{ м}$, діаметром $d = 0,02\text{ м}$, верхні кінці яких розташовані на глибині $t_0 = 0,8\text{ м}$. Вертикальні електроди з'єднані між собою за допомогою горизонтального електрода – сталеві шини перетином $4 \times 40\text{ мм}$, покладеної в землі на глибині $t_0 = 0,8\text{ м}$. Вертикальні електроди розташовані на відстані $a = 3\text{ м}$ друг від друга. Тип заземлювача вибираємо контурний за периметром ділянки.

Вибираємо 3-ю кліматичну зону. Визначаємо коефіцієнт сезонності φ для однорідної землі: $\varphi_s = 1,2$, $\varphi_z = 2$.

Питомий опір однорідного ґрунту (суглинок) $\rho_0 = 100\text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Розраховуємо питомий опір ґрунту для вертикального електрода:

$$\rho_{\epsilon} = \varphi_{\epsilon} \cdot \rho_0 = 1,2 \cdot 100 = 120 \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (5.1)$$

Питомий опір ґрунту для горизонтального електрода:

$$\rho_{\epsilon} = \varphi_{\epsilon} \cdot \rho_0 = 2 \cdot 100 = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (5.2)$$

Опір одиночного вертикального заземлітеля:

$$\begin{aligned} R_{\epsilon} &= \frac{\rho_{\epsilon}}{2 \cdot \pi \cdot l_{\epsilon}} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l_{\epsilon}}{d} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot (t_0 + 0,5 \cdot l_{\epsilon}) + l_{\epsilon}}{4 \cdot (t_0 + 0,5 \cdot l_{\epsilon}) - l_{\epsilon}} \right) = \\ &= \frac{120}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,5} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 1,5}{0,02} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot (0,8 + 0,75) + 1,5}{4 \cdot (0,8 + 0,75) - 1,5} \right) = 67 \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (5.3)$$

Число вертикальних заземлітелей:

$$n = \frac{R_{\epsilon}}{R_{\text{н}}} = \frac{67}{4} = 17. \quad (5.4)$$

Довжина горизонтальної смуги:

$$l_{\epsilon} = n \cdot a = 17 \cdot 3 = 51 \text{ м}. \quad (5.5)$$

Опір горизонтального заземлітеля:

$$R_{\epsilon} = \frac{\rho_{\epsilon}}{2 \cdot \pi \cdot l_{\epsilon}} \ln \frac{2 \cdot l_{\epsilon}^2}{b \cdot t} = \frac{200}{2 \cdot 3,14 \cdot 51} \ln \frac{2 \cdot 51^2}{0,04 \cdot 0,8} = 7,5 \text{ Ом}; \quad (5.6)$$

де b - ширина сталеві горизонтальної смуги.

Визначаємо опір групового заземлітеля:

$$R_3 = \frac{R_6 \cdot R_z}{R_6 \cdot \eta_z + R_z \cdot \eta_6 \cdot n} = \frac{67 \cdot 7,5}{67 \cdot 0,344 + 7,5 \cdot 0,655 \cdot 17} = 4,72 \text{ Ом}; \quad (5.7)$$

де η_6 – коефіцієнт використання вертикальних заземлітелей;

η_z – коефіцієнт використання горизонтальних заземлітелей.

За умовами безпеки заземлення повинне мати малий опір ($R_n < 4 \text{ Ом}$), забезпечити яке можна шляхом збільшення геометричних розмірів електродів або збільшивши їхнє число, з'єднаних у контур. Другий шлях набагато економічніший по витратах металу й інших умов. Крім того, при застосуванні декількох електродів можна вирівняти потенційну криву на території, де вони розміщені. Оскільки розрахункове $R_3 = 4,72 \text{ Ом} > R_n = 4 \text{ Ом}$, те збільшуємо кількість вертикальних електродів до $n = 24$.

Тоді довжина горизонтальної смуги:

$$l_z = n \cdot a = 24 \cdot 3 = 72 \text{ м}. \quad (5.8)$$

Опір горизонтального заземлітеля:

$$R_z = \frac{\rho_z}{2 \cdot \pi \cdot l_z} \cdot \ln \frac{2 \cdot l_z^2}{b \cdot t} = \frac{200}{2 \cdot 3,14 \cdot 72} \cdot \ln \frac{2 \cdot 72^2}{0,04 \cdot 0,8} = 5,6 \text{ Ом}. \quad (5.9)$$

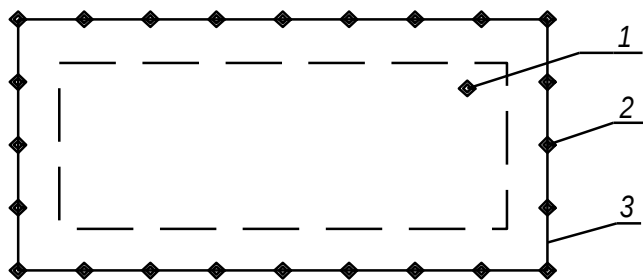
Опір групового заземлітеля:

$$R_3 = \frac{R_6 \cdot R_z}{R_6 \cdot \eta_z + R_z \cdot \eta_6 \cdot n} = \frac{67 \cdot 5,6}{67 \cdot 0,312 + 5,6 \cdot 0,624 \cdot 24} = 3,6 \text{ Ом}; \quad (5.10)$$

де $\eta_6 = 0,624$; $\eta_z = 0,312$.

Тому що $R_3 = 3,6 \text{ Ом} < R_n = 4 \text{ Ом}$, те цей результат приймаємо як остаточний.

Таким чином, проєктований заземлітель контурний, складається з 24 вертикальних стрижневих електродів довжиною 1,5 м, діаметром $d = 20 \text{ мм}$, заглиблених у землю на 0,8 м і з'єднаних сталевією горизонтальною смугою довжиною 75 м, перетином 4x40 мм (рис. 3.4).



1 - монтажна ділянка, 2 - вертикальний заземлювач, 3 - горизонтальний заземлювач

Рисунок 5.1 - Схема заземлення

5.2 Розрахунок автоматичного захисного відключення

Захисним відключенням називається система захисту, що забезпечує автоматичне відключення всіх фаз або полюсів аварійної ділянки мережі з напругою до 1000 В з повним часом відключення з моменту виникнення однофазного замикання не більше 0,2 с.

Експериментальний стенд харчується напругою 220 В, перебуваючи наприкінці лінії 380/220 В и будучи занульованим споживачем енергії. Внаслідок далекості її від трансформатора можливі випадки відмови занулення. Разом з тим за умовою безпеки потрібне безумовне відключення установки при замиканні фази на корпус, причому напруга дотику $U_{np.\partial on}$ не повинна перевищувати довгостроково 60В. Для виконання цих умов додаємо в установку пристрій, що відключає її реагуючи на потенціал корпусу. При цьому використовується реле напруги, у якого напруга спрацьовування $U_{cp} = 30$ В, активний опір обмотки $R_p = 400$ Ом і індуктивний $X = 200$ Ом.

Приймаємо, що при торканні до корпусу людина стоїть на сирій землі поза зоною розтікання струму із заземлювачів, тобто вважаємо, що $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$. У цьому випадку умова безпеки буде:

$$\varphi_{з.\partial on} = U_{np.\partial on}, \text{ В.} \quad (5.11)$$

Отже

$$U_{cp} = U_{np.дон} \cdot \left| \frac{Z_p}{Z_p + R_г} \right| \quad (5.12)$$

$$30 = 60 \cdot \frac{\sqrt{400^2 + 200^2}}{\sqrt{(400 + R_г)^2 + 200^2}} \text{ В},$$

звідки знаходимо значення опору допоміжного заземлення: $R_г \leq 470 \text{ Ом}$, при якому захисне відключення буде спрацьовувати, якщо напруга дотику досягне 60 В.

Таким чином, якщо при дотику людини до корпусу встаткування або фазі мережі напруга дотику (або струм через людину) перевищить довгостроково припустиме значення, то виникає реальна погроза поразки людини струмом, і мірою захисту в цьому випадку може бути лише швидкий розрив кола струму через людину, тобто відключення відповідної ділянки мережі.

Для виконання цього завдання в якості реле в схемі захисного відключення вибираємо однофазне реле змінного струму з тиристорним виходом 5П19.1-4 з параметрами:

- | | |
|---|--------|
| – напруга, що комутується (ср. кв. значення), В | – 140; |
| – напруга, що комутується (пік. значення), В | – 400; |
| – струм, що комутується, А | – 1,0; |
| – ударний струм, А | – 15. |

РОЗДІЛ 6

ПРАВИЛА ЗАПОБІГАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ШКІДЛИВИМИ РІДКИМИ РЕЧОВИНАМИ, ЩО ПЕРЕВОЗЯТЬСЯ НАЛИВОМ

6.1 Правило 7 приймальні споруди і пристрої для вивантаження вантажу біля причалів

1. Уряд кожної сторони Конвенції зобов'язується передбачити приймальні споруди, що відповідають потребам суден, що користуються її портами, причалами або ремонтними портами, як зазначено нижче:

а) порти і причали навантаження і вивантаження забезпечуються спорудами, достатніми для прийому без надмірної затримки суден таких залишків і сумішей, що містять шкідливі речовини, які могли б залишитися для видалення з перевозять їх судів як наслідок [15];

б) ремонтні порти, що проводять ремонт танкерів-хімовозів, забезпечуються спорудами, достатніми для прийому залишків і сумішей, що містять шкідливі рідкі речовини.

2. Уряд кожної сторони визначає типи споруд, передбачених для цілей пункту 1 цього Правила, в кожному розташованому на його території порту навантаження і вивантаження, термінали і порту ремонту суден і повідомляє про це Організацію.

3. Уряд кожної сторони Конвенції зобов'язується забезпечити, щоб причали для вивантаження вантажу були обладнані пристроями, що полегшують зачистку вантажних танків суден, вивантажують шкідливі рідкі речовини на цих терміналах. Вантажні шланги і трубопроводи терміналу, що містять вивантажується за судів шкідливі рідкі речовини, не повинні допускати стоку цих речовин назад на судно.

4. Кожна сторона повідомляє Організацію для сповіщення зацікавлених сторін про будь-якому випадку передбачуваної недостатності необхідних пунктом 1 цього

Правила споруд або необхідних пунктом 3 цього правила пристроїв.

6.2 Правило 8 заходи контролю

1. а) Уряд кожної сторони Конвенції призначає або уповноважує інспекторів для цілей виконання цього правила. Інспектори здійснюють контроль відповідно до процедури контролю, розробленої Організацією.
2. б) Капітан судна, що перевозить шкідливі рідкі речовини наливом, забезпечує виконання положень правила 5 і цього правила і заповнення журналу вантажних операцій відповідно до правила 9 [15] в усіх випадках, коли проводяться операції, згадані в правилі 9.
3. с) Звільнення, згадане в підпунктах 2 (b), 5 (b), 6 (c) або 7 (c) цього правила, може бути представлено урядом якій передається вантаж боку тільки судну, зайнятому в рейсах в порти або термінали, що знаходяться під юрисдикцією інших держав - сторін цієї Конвенції . Якщо таке звільнення надано, то відповідний запис, зроблений в журналі вантажних операцій, завіряється інспектором, згаданим у підпункті (а) цього пункту.

Речовини категорії А у всіх районах

2. Щодо речовин категорії А у всіх районах застосовуються такі положення: а)
3 з урахуванням підпункту (b) цього пункту танк, з якого вивантажено вантаж, піддається миттю відповідно до вимог пункту 3 і 4 цього правила, перш ніж судно залишить порт вивантаження .

б) На прохання капітана судна уряд якому передається вантаж може звільнити судно від виконання вимог, зазначених у підпункті (а) цього пункту, якщо вона впевнилися, що:

(І) розвантажений танк підлягає завантаженні тим же речовиною або іншим речовиною, сумісним з попереднім, і що до навантаження танк не буде піддаватися мийці або баластировку;

(II) розвантажений танк не буде піддано мийці, ні баластировку в море і положення пункту 3 або 4 цього правила будуть виконані в іншому порту, за умови, що письмово підтверджено, що в цьому порту є приймальне спорудження, достатню для такої мети;

(III) залишки вантажу будуть видалені методом вентиляції, схваленим Адміністрацією і заснованим на нормативах, розроблених Організацією.

3. Якщо танк підлягає мийці відповідно до пункту 2 (а) цього правила, то промивні води, що утворилися при митті танка, скидаються в приймальне спорудження щонайменше до тих пір, поки концентрація речовини в стоках, що скидаються, визначається аналізом проб стоку, взятих інспектором, не знизиться до концентрації, встановленої в пункті 1 або 7 правила 5, в залежності від конкретного випадку, цього Додатка. Якщо необхідної концентрація досягнута, що залишилася в танку промивальну воду продовжують скидати в приймальне спорудження до тих пір, поки танк не буде пустим. Відповідні записи про ці операції вносяться в журнал вантажних операцій і завіряються інспектором, згаданим в підпункті 1 (а) цього правила.

4. Якщо уряд отримує вантаж боку переконалося в практичну неможливість виміру концентрації речовини в стоці без надмірної затримки судна, ця сторона може допустити інший метод, якщо він є еквівалентним методу, зазначеному в пункті 3 цього правила, за умови, що:

а) танк підданий попередньої мийці відповідно до методу, схваленим Адміністрацією і заснованим на стандартах, розроблених Організацією;

б) інспектор, згаданий в підпункті 1 (а), засвідчив в журналі вантажних операцій, що:

(I) танк, його насоси і трубопроводи спорожнені;

(II) попереднє миття проведена відповідно до методу попереднього миття,

схваленим Адміністрацією для даного танка і для даної речовини;

(III) промивні води, що утворилися в результаті такої попередньої мийки танка, скинуті в приймальне спорудження і танк опорожнен. Речовини категорій В та С за межами особливих районів.

5. Щодо речовин категорій В та С за межами особливих районів застосовуються такі положення:

а) З урахуванням положень підпункту (b) цього пункту танк, з якого вивантажено вантаж, піддається попередній мийці, перш ніж судно залишить порт вивантаження, всякий раз, коли :

(I) вивантажене речовина віднесено в стандартах, розроблених Організацією, до речовин, що створює залишки в кількості, що перевищує максимальну кількість, яке може бути скинуто в море відповідно до пункту 2 або 3 правила 5 [15] в разі перевезення речовин в або с відповідно;

(II) вивантаження проводиться не у відповідності з умовами викачування з даного танка, схваленими Адміністрацією і заснованими на стандартах, розроблених Організацією і згаданих в пункті 5 правила 5А [15], якщо тільки не прийняті альтернативні заходи, що задовольняють згаданим в пункті 1 (а) цього Правил інспектора, для видалення з судна залишків вантажу до відповідної кількості, зазначеного в правилі 5А цього Положення, що застосовується метод попереднього миття повинен бути схвалений Адміністрацією та заснований на стандартах, розроблених Організацією, а що утворилися в результаті мийки танка промивні води будуть скинуті в приймальне спорудження в порту вивантаження.

б) На прохання капітана судна уряд якій передається вантаж боку може звільнити судно від виконання вимог підпункту (а) цього пункту, якщо воно переконалося, що:

(I) розвантажений танк підлягає завантаженні тим же речовиною або іншим

речовиною, сумісним з попереднім, і що до навантаження танк не буде піддаватися мийці або баластировку;

(II) розвантажений танк не буде піддано мийці, ні баластировку в море, а буде підданий попередньої мийці в іншому порту згідно з методом, схваленим Адміністрацією і заснованим на стандартах, розроблених Організацією, а що утворилися в результаті мийки танка промивні води будуть скинуті в приймальне спорудження, за умови, що письмово підтверджено, що в цьому порту є приймальне спорудження, достатню для такої мети;

(III) залишки вантажу будуть видалені методом вентиляції, схваленим Адміністрацією і заснованими стандартах, розроблених Організацією.

Речовини категорії В особливих районах

6. Щодо речовин категорії В особливих районах застосовуються такі положення:

а) з урахуванням положень пунктів (b) і (c) танк, з якого вивантажено вантаж,

піддається попередній мийці, перш ніж судно залишить порт вивантаження. Застосовуваний метод попереднього миття повинен бути схвалений Адміністрацією та заснований на стандартах, розроблених Організацією, а що утворилися в результаті мийки танка промивні води скидаються в приймальне спорудження в порту вивантаження.

б) Вимоги підпункту (a) цього пункту не застосовуються, коли одночасно виконуються наступні умови:

(I) вивантажене речовина категорії В віднесено в стандартах, розроблених Організацією, до речовин, що створює залишки в кількості, що не перевищує максимальної кількості, яке може бути скинуто в море за межами особливих районів відповідно до пункту 2 правила 5 [15], і залишки зберігаються на борту для подальшого скидання в море за межами особливого району відповідно до пункту 2

правила 5 [15];

(II) вивантаження проводиться відповідно до умов викачування з даного танка, схваленими Адміністрацією і заснованими на стандартах, розроблених Організацією і згаданих в пункті 5 правила 5А [15], а якщо не можна дотримати схвалені умови викачування, прийняті альтернативні заходи, що задовольняють згаданого в підпункті 1 (а) цього правила інспектора, для видалення з судна залишків вантажу до відповідної кількості, зазначеного в правилі 5А [15].

с) На прохання капітана судна уряд якій передається вантаж боку може звільнити судно від виконання вимог підпункту (а) цього пункту, якщо воно переконалося, що:

(I) розвантажений танк підлягає завантаженні тим же речовиною або іншим речовиною, сумісний з попереднім, і що до навантаження танк не буде піддаватися мийці або баластировку;

(II) розвантажений танк не буде піддано мийці, ні баластировку в море, а буде підданий попередньої мийці в іншому порту згідно з методом, схваленим Адміністрацією і заснованим на стандартах, розроблених Організацією, а що утворилися в результаті мийки танка промивні води будуть скинуті в приймальне спорудження, за умови, що письмово підтверджено, що в цьому порту є приймальне спорудження, достатню для такої мети;

(III) залишки вантажу будуть видалені методом вентиляції, схваленим Адміністрацією і заснованим на стандартах, розроблених Організацією.

Речовини категорії С в особливих районах

7. Щодо речовин категорії С в особливих районах застосовуються такі положення:

а) З урахуванням положень підпунктів (b) і (с) цього пункту танк, з якого вивантажено вантаж, піддається попередній мийці, перш ніж судно залишить порт

вивантаження, всякий раз, коли:

(I) вивантажене речовина категорії С віднесено в стандартах, розроблених Організацією, до речовин, що створює залишки в кількості, що перевищує максимальну кількість, яке може бути скинуто в море відповідно до пункту 9 правила 5 [15];

(II) вивантаження проводиться не у відповідності з умовами викачування з даного танка, схваленими Адміністрацією і заснованими на стандартах, розроблених Організацією і згаданих в пункті 5 правила 5А [15], якщо тільки не прийняті альтернативні заходи, що задовольняють інспектора, згаданого в пункті 1 (а) цього правила, для видалення з судна залишків вантажу до відповідної кількості, зазначеного в правилі 5А [15].

Застосовуваний метод попереднього миття повинен бути схвалений Адміністрацією та заснований на стандартах, розроблених Організацією, а що утворилися в результаті мийки танка промивні води скидаються в приймальне спорудження в порту вивантаження.

б) Вимоги підпункту (а) цього пункту не застосовуються, коли одночасно задовольняються всі наступні умови:

(I) вивантажене речовина категорії С віднесено в стандартах, розроблених Організацією, до речовин, що створює залишки в кількості, що не перевищує максимальної кількості, яке може бути скинуто в море за межами особливих районів відповідно до пункту 3 правила 5 [15], і залишки зберігаються на борту для подальшого скидання в море за межами особливого району відповідно до пункту 3 правила 5 [15];

(II) вивантаження проводиться відповідно до умов викачування з даного танка, схваленими Адміністрацією і заснованими на стандартах, розроблених Організацією і згаданих в пункті 5 правила 5А [15], або, якщо не можна дотримати умови викачування, прийняті альтернативні заходи, що задовольняють інспектора,

згаданого в пункті 1 (а) цього правила, для видалення з судна залишків вантажу до відповідної кількості, зазначеного в правилі 5А [15].

с) На прохання капітана судна уряд якій передається вантаж Сторони може звільнити судно від виконання вимог підпункту (а) цього пункту, якщо воно переконалося, що:

(І) розвантажений танк підлягає завантаженні тим же речовиною або іншим речовиною, сумісним з попереднім, і що до навантаження танк не буде піддаватися мийці або баластировку;

(ІІ) розвантажений танк не буде підданий ні мийці, ні баластировку в море, а буде підданий попередньої мийці в іншому порту згідно з методом, схваленим Адміністрацією і заснованим на стандартах, розроблених Організацією, а що утворилися в результаті мийки танка промивні води будуть скинуті в приймальне спорудження за умови, що письмово підтверджено, що в цьому порту є приймальне спорудження, достатню для такої мети; або (ііі) залишки вантажу будуть видалені методом вентиляції, схваленим Адміністрацією і заснованим на стандартах, розроблених

Організацією. Речовини категорії D у всіх районах

8. Щодо речовин категорії D: танк, з якого вивантажено вантаж, піддається миттю, а що утворилися в результаті мийки танка промивні води скидаються в приймальне спорудження, або збережені в танку залишки розбавляються і скидаються в море відповідно до пункту 4 правила 5 [15].

Скидання з відстійного танка

9. Будь-які залишки, які зберігаються на борту судна в отстойном танку, включаючи залишки льял насосного відділення, що містять речовини категорії А, або в межах особливого району, що містять речовини категорії А чи В, скидаються в приймальне спорудження відповідно до положень пунктів 1, 7 або 8 правила 5 цього

Додатка, в залежності від того, яке з них може бути застосовано.

8. Щодо речовин категорії D: танк, з якого вивантажено вантаж, Правило 9
Журнал вантажних операцій

1. Кожне судно, до якого застосовується цей Додаток, забезпечується журналом вантажних операцій.

Він може бути частиною офіційного судового журналу або окремим журналом за формою, встановленою Додатком IV [15].

2. Журнал вантажних операцій заповнюється по кожному танку у всіх випадках, коли на судні виробляються будь-які із зазначених нижче операцій з шкідливими рідкими речовинами:

(I) навантаження вантажу;

(II) внутрішньосуднового перекачування вантажу;

(III) вивантаження вантажу;

(IV) очистка вантажних танків;

(V) прийом баласту в вантажні танки;

(VI) скидання баласту з вантажних танків;

(VII) видалення залишків в приймальні споруди;

(VIII) скидання в море або видалення залишків методом вентиляції відповідно до правила 5 [15].

3. У разі будь-якого із згаданих в статті 8 цієї Конвенції і в правилі 6 цього Додатка скидання будь-якого шкідливого рідкої речовини або суміші, що містить таку речовину, незалежно від того, чи є він навмисно або внаслідок аварії, в журналі вантажних операцій проводиться запис з викладенням обставин і причин такого

скидання.

4. Після того як інспектор, призначений або уповноважений урядом сторони Конвенції для нагляду за будь-якими операціями відповідно до цього Додатка, оглянув судно, він виробляє відповідний запис в Журналі вантажних операцій.

5. Кожна операція, про яку йдеться в пунктах 2 і 3 цього правила, детально і без зволікання реєструється в журналі вантажних операцій так, щоб всі записи в журналі, що відносяться до даної операції, були повністю завершеними. Кожен запис в журналі підписується особою або особами, відповідальними за відповідну операцію, і кожна сторінка підписується капітаном судна. Записи в журналі вантажних операцій виробляються на офіційній мові держави, під прапором якої судну дано право плавання, а на суднах, що мають Міжнародне свідоцтво про запобігання забрудненню під час перевезення шкідливих рідких речовин наливом або довідку, зазначену в правилі 12А [15], англійською або французькою мовою. У разі спору або різночитання перевага віддається записів на офіційному національній мовою держави, під прапором якої судну дано право плавання.

6. Журнал вантажних операцій зберігається на судні, за винятком буксированих судів без екіпажу, в такому місці, яке легко доступно для перевірки. Журнал зберігається протягом трьох років після внесення до нього останнього запису.

7. Компетентні органи уряду боку можуть перевірити журнал вантажних операцій на борту будь-якого судна, що знаходиться в її порту, до якого застосовується цей Додаток, і зняти копію з будь-якого запису в цьому журналі, а також вимагати, щоб капітан судна запевнив, що ця копія є справжньої копією такого запису. Будь-яка така копія, завірена капітаном судна як справжня копія запису в журналі вантажних операцій, може бути пред'явлена незалежно від розгляду в якості доказу фактів, викладених в запису. Перевірка журналу вантажних операцій і зняття завіреної копії компетентними органами відповідно до цього пункту здійснюються якомога швидше, щоб не викликати необґрунтованої затримки судна.

Висновки

Проведений аналіз вітрогенераторних систем, їх імітаційних схем на основі електроприводу постійного струму, а також розрахунків елементів цього електропривода. Це дозволяє стверджувати що більшість цих систем можливо моделювати та досліджувати без безпосереднього монтажу. Але досвід останніх досягнень в області електроприводів доводить , що можна у експериментальній установці використовувати також і комплектні електроприводи.

Отже у магістарської роботі здійснено моделювання вітрогенераторної системи завдяки програмної оболонці ElectronicsWorkBench. У зв'язку з цим отримані наступні результати :

- доведена можливість моделювання вітрогенераторної установки за допомогою імітації її електроприводом постійного струму;
- сформовано функціональну схему системи керування електроприводу;
- складено алгоритми для чисельного експерименту;
- визначено технічні заходи з охорони праці для обслуговування наведеного електропривода.

ЛІТЕРАТУРА

1. Башарин Н.К., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л: Энергоиздат, 1982г. – 392с., ил.
2. Вибір елементів реверсивних тиристорних перетворювачів електроприводів постійного струму./В.Т. Пілецький. – К.:ІСДО,1994р.
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей.
4. Правила устройств электроустановок.
5. Кашкаров А.П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции. –ДМК Пресс, 2011г. –144с.
6. Рассел Джесси Ветрогенератор. –Книга по требованию, 2012г. –66 с.
7. Твайделл Дж. Уэйр А. «Возобновляемые источники энергии» М.: Энергоатомиздат, 1990.
8. Robert Gasch (Hrsg). «Windkraftanlagen-B.G.» Teubner Stuttgart, 1993
9. Siegfried Heier. «Windkraftanlagen im Netzbetrieb, B.G.» Teubner Stuttgart, 1996.
10. Bolotov A.V, Bolotov C.A. VERTICAL AXIS WIND TURBINE (VAWT) International Patent Classification F03/04. International Publication Number W003/040554 Al. PCT, 15.05.2003.
11. Вихревая роторная ВЭС материалы конференции ВИЭСХ № 2, 2002
12. Болотов А.В., Новокшенов В.С., Бакенов К.А. Ганага Е.Ф. Вентильный генератор патент РК № 8086 .
13. Шарейко, Д. Ю. Модернізація електропривода промислового робота / Д. Ю. Шарейко, О. С. Надолішний // Матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв : НУК, 2024.–С.512–515.– Режим доступу: <https://nuos.edu.ua/nauka/konferencii/konferencii-2024-roku/hv-mizhnarodna-naukovo-tehnicna-konferenciya-innovacii-v-sudnobuduvanni-ta-oceanotehnici/> (26-27 вересня 2024 рік)
14. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 года, измененная Протоколом 1978 года к ней (МАРПОЛ 73/78) (с изменениями на 17 февраля 1978 года)

Імітатор вітроенергетичної установки

Студент магістратури: Надолішний Олександр Сергійович

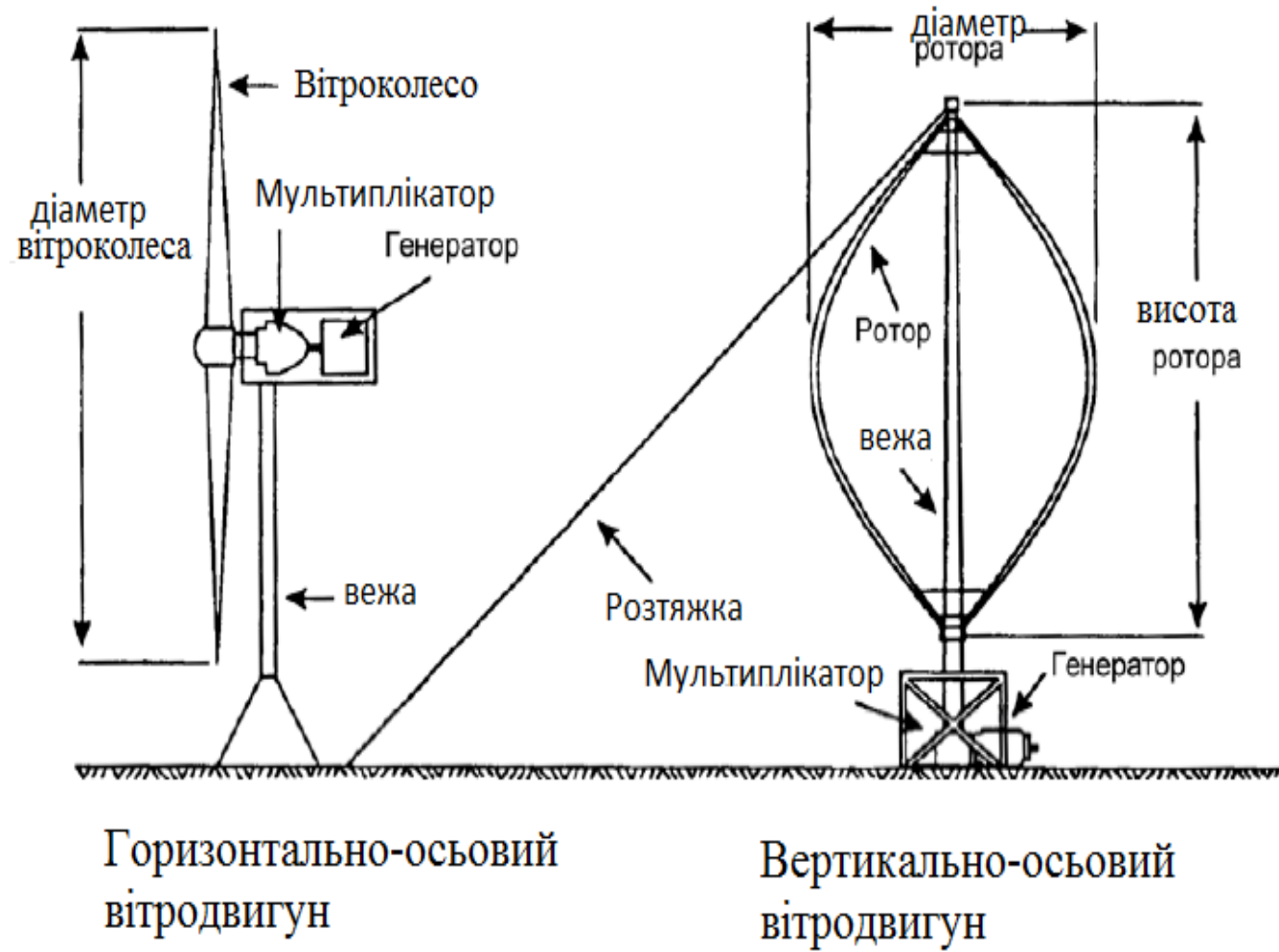
Науковий керівник: к.т.н., доцент Надточій Анатолій Вікторович

Мета дослідження: На основі існуючих теоретичних досліджень провести синтез імітатора вітротурбіни (ВТ) для дослідження вітроенергетичної установки.

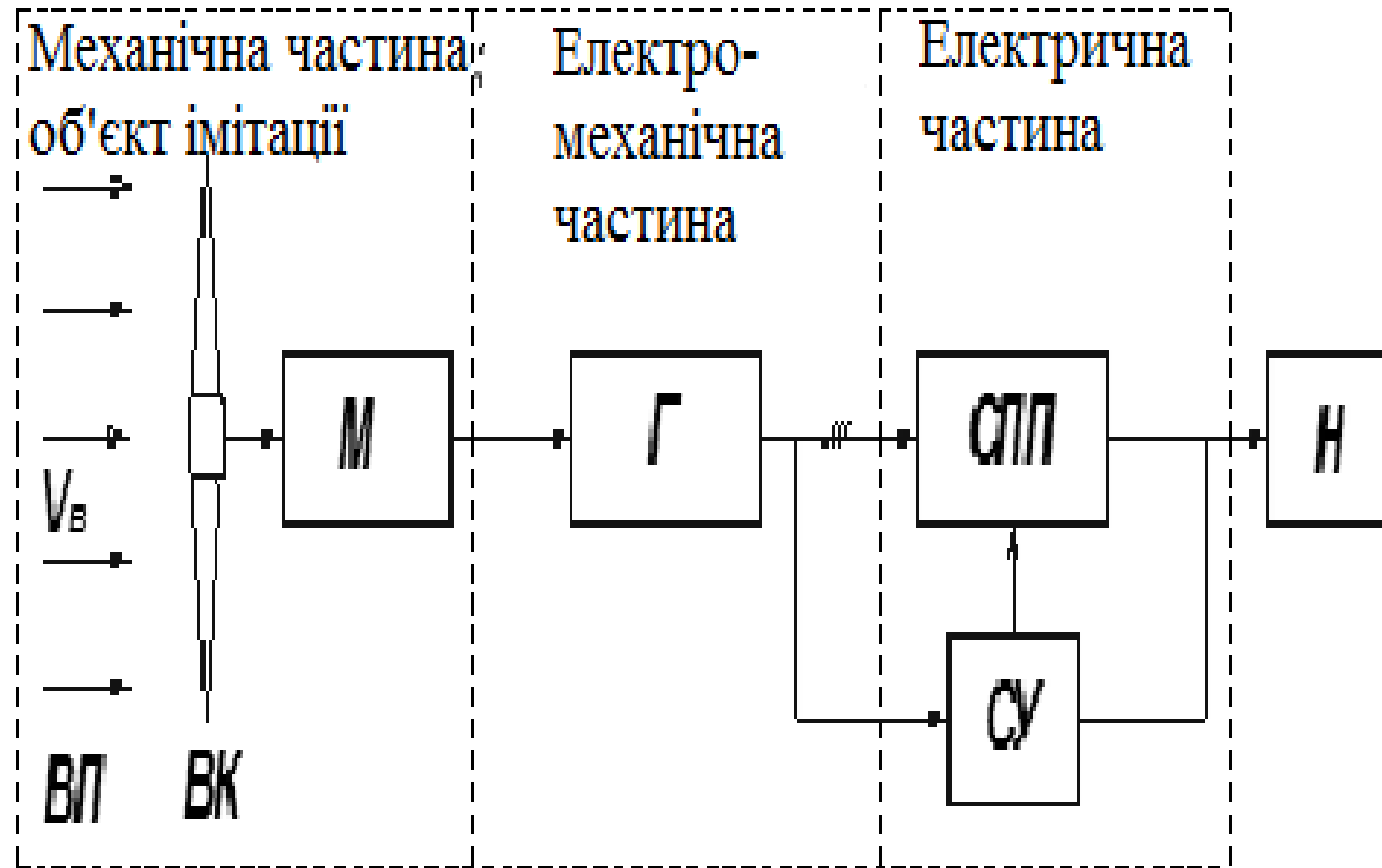
Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Скласти математичну модель імітатора ВТ на основі електропривода постійного струму.
2. Провести теоретичні дослідження, щодо поведінки електропривода з реальними параметрами вітру та перевірити адекватність імітатора.
3. Довести доцільність використання імітатора ВТ.

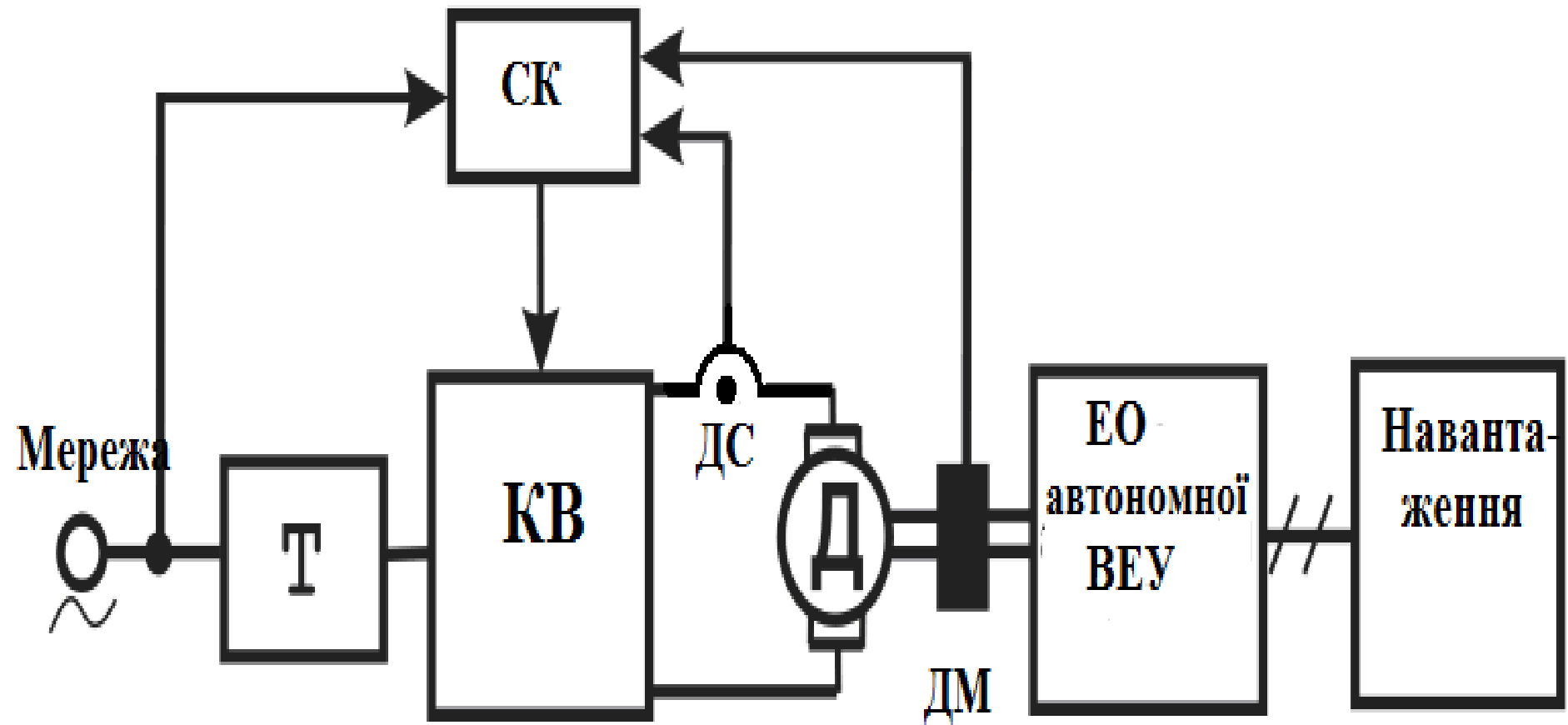
Основні види вітродвигунів



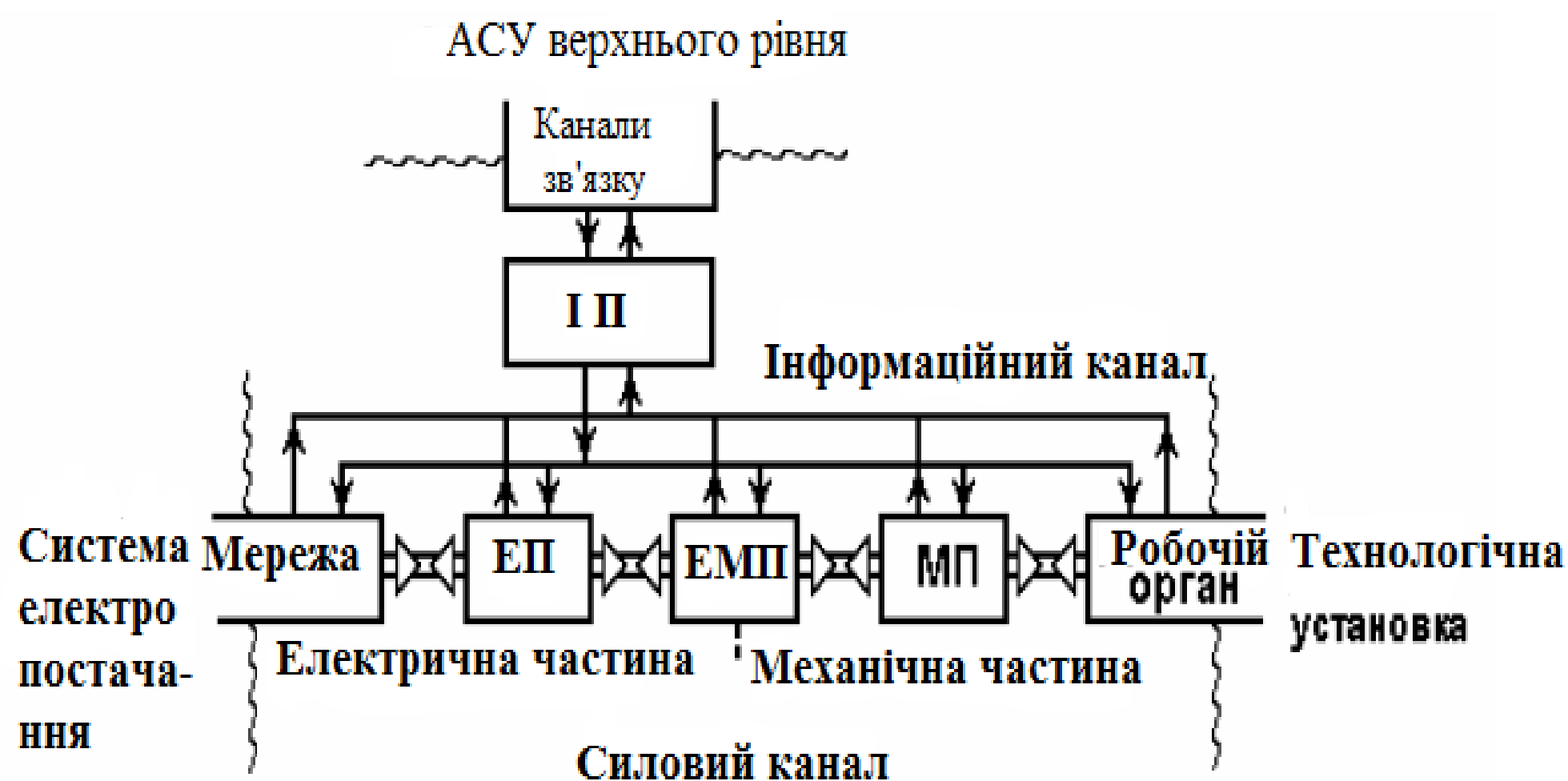
Структурна схема ВЕУ



Структурна схема імітатора ВТ



Загальна структура електропривода



Структурна схема автоматизованого електропривода постійного струму імітатора ВТ

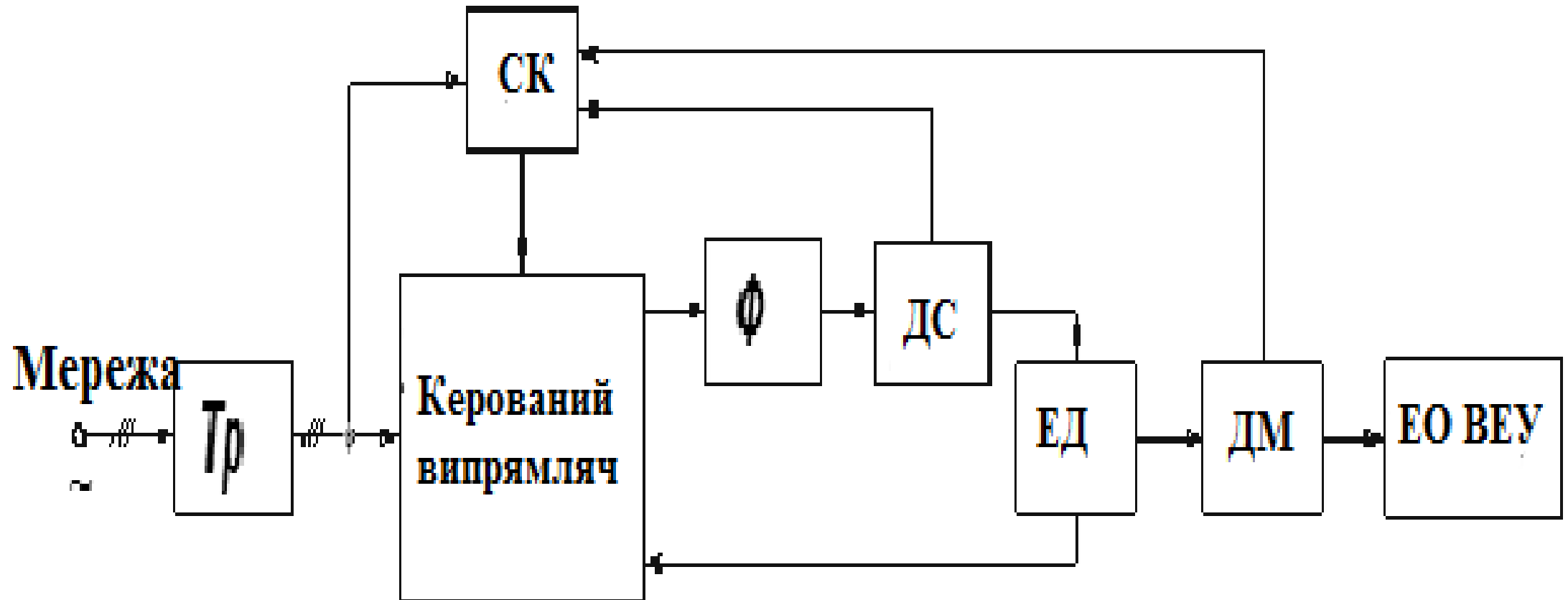
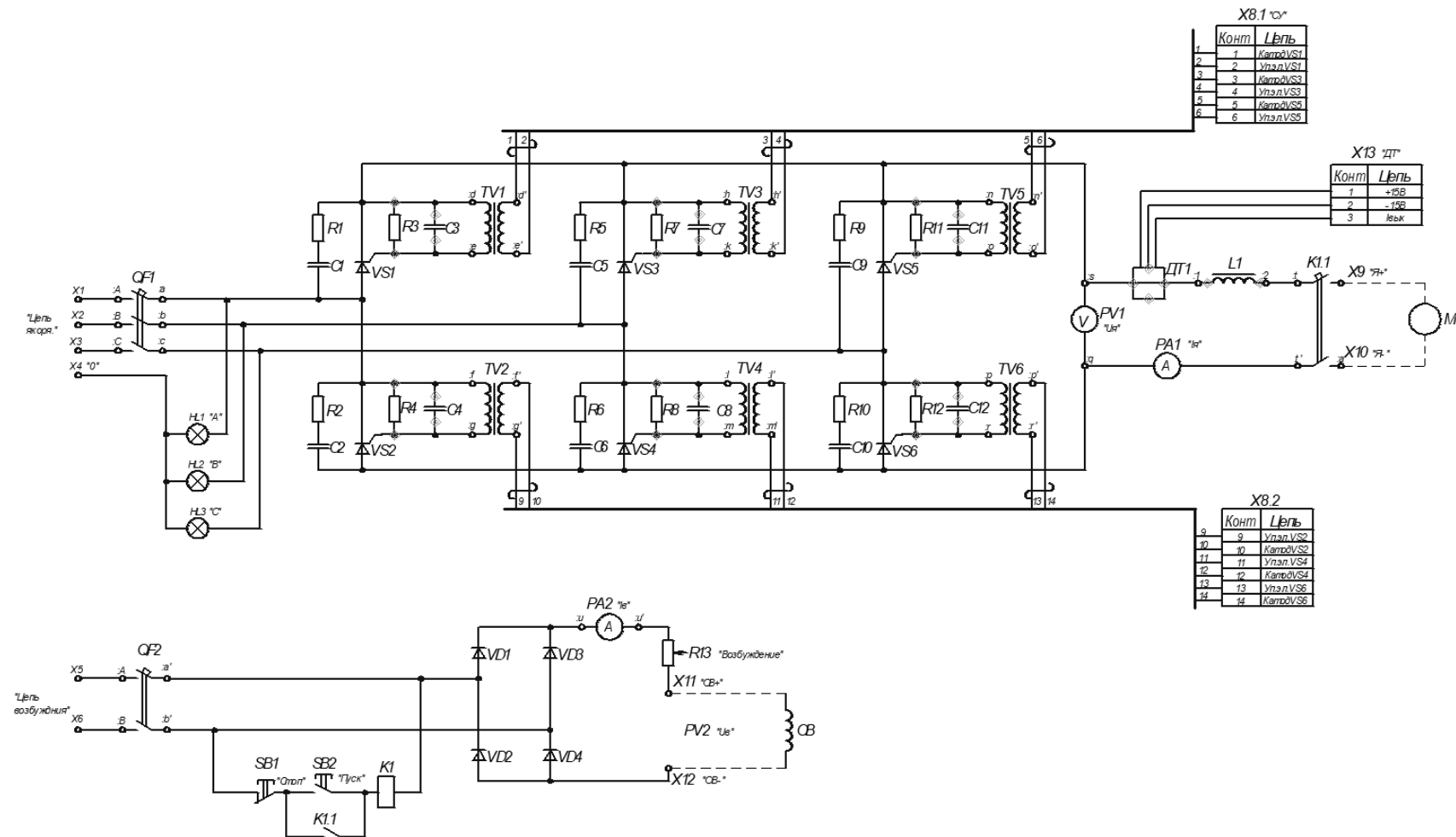
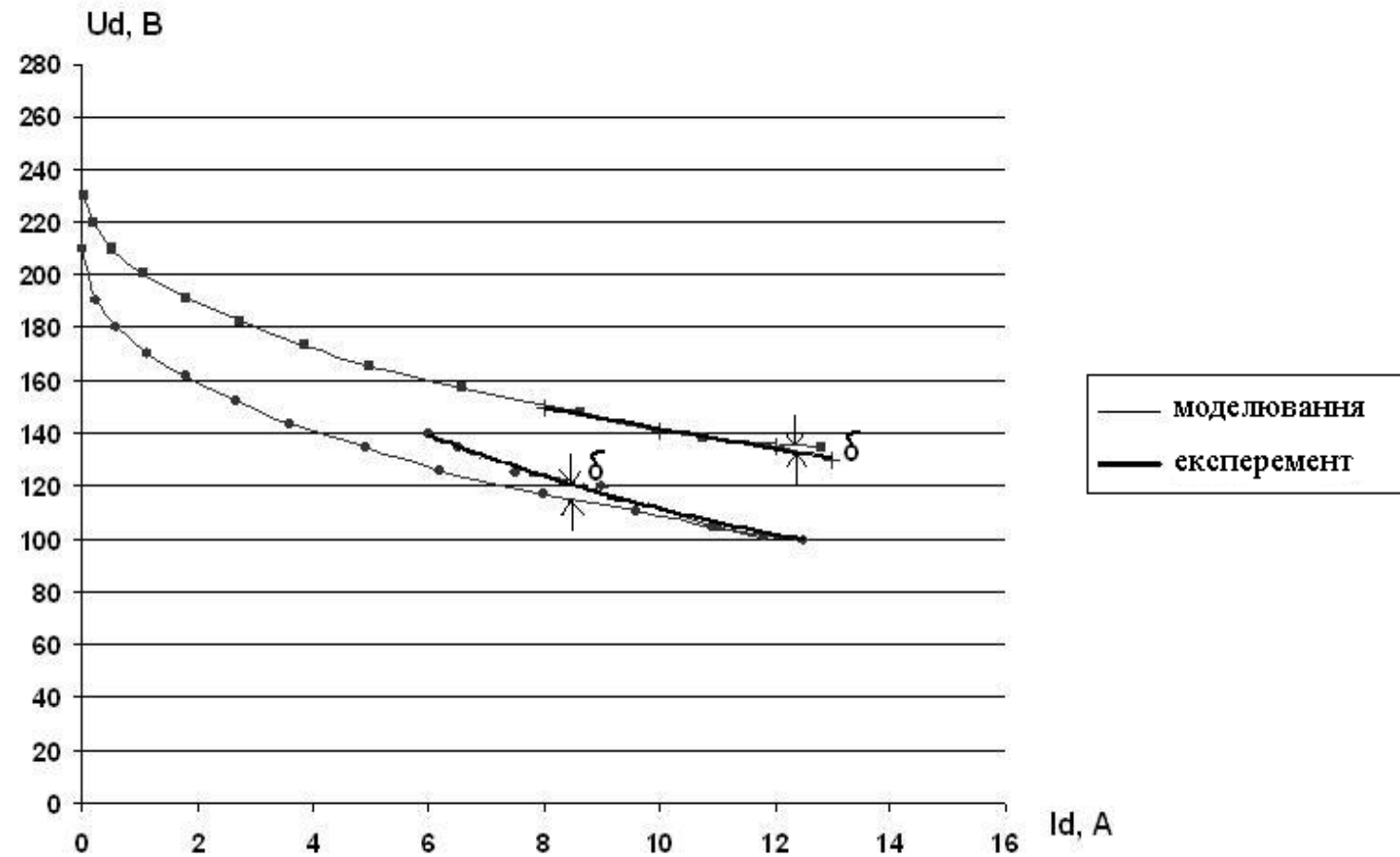


Схема електрична принципова імітатора



Сімейство зовнішніх характеристик розрахунку й експерименту



ВИСНОВКИ

У магістерській роботі здійснено моделювання вітрогенераторної системи завдяки програмній оболонці ElectronicsWorkBench. У зв'язку з цим отримані наступні результати :

- доведена можливість моделювання вітрогенераторної установки за допомогою імітації її електроприводом постійного струму;
- сформовано функціональну схему системи керування електроприводу;
- складено алгоритми для чисельного експерименту;
- визначено технічні заходи з охорони праці для обслуговування наведеного електропривода.