

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"**

на правах рукопису

**РУДИЙ
Тарас Володимирович**

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ
ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З ОПТИМАЛЬНИМ
ВІДБОРОМ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОДВИГУНА І
СТАБІЛІЗАЦІЄЮ ЧАСТОТИ НА ВИХОДІ
ІНВЕРТОРА СТРУМУ**

05.09.03 - *електротехнічні комплекси та системи,
включаючи їх управління та регулювання*

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів - 1996

27.5-1



00754316 (Q)

Дисертацією є рукопис
Робота виконана в Українському державному університеті

Науковий керівник

- доктор технічних наук, професор
Плахтіна Омелян Григорович

Консультант

- доктор технічних наук
Цгоєв Руслан Сергійович

Офіційні опоненти

- доктор технічних наук, професор
Гордієнко Володимир Іванович

- кандидат технічних наук, доцент
Мискайлів Микола Іванович

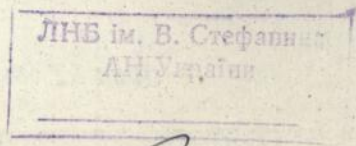
Провідна організація

- Західний регіональний центр науково-дослідного, проектнo-конструкторського інституту нетрадиційної енергетики і електротехніки Міністерства енергетики і електрифікації України, м. Борислав.

Захист відбудеться на засідання спеціалізованої ради К.04.06.17. у державному університеті "Львівська політехніка" "8" жовтня 1996 о "14" годині за адресою: 290010, Львів, вул. С. Вандери No 12. *aug. 114*

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці ДУ "Львівська політехніка" (290008, м.Львів, вул. Професорська No 1).

Автореферат розісланий "23" лютого 1996 р.



Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

Марущак Я.Ю.

AB - 34.159 - 3 -

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема використання енергії вітру не є новою, однак, з використанням сучасних досягнень в галузі нових матеріалів, перетворення механічної енергії в електричну, засобів керування вона вимагає розв'язання на якісно новому рівні. В загальній проблемі окремо розглядається задача перетворення механічної енергії в електричну з використанням відповідних засобів керування. Серед різноманітності схем такого перетворення цікавою є система "синхронний генератор - перетворювач частоти з ланкою постійного струму - система автоматичного керування". Дана система дозволяє забезпечувати оптимальний відбір потужності вітродвигуна шляхом регулювання його кутової частоти як функції швидкості вітру. Використання в схемі інвертора струму дозволяє передавати через перетворювач частоти велику потужність, однак, при цьому існує проблема його стабільної роботи на автономне навантаження.

Дослідження потужних електромеханічних систем з огляду на економічність доцільно проводити методами математичного моделювання на сучасних ЕОМ, для чого необхідні адекватні оригіналу математичні моделі і відповідне програмне забезпечення.

Аналіз літератури в галузі електромеханічних систем і електроенергетики свідчить, що на сьогодні існує необхідність розробки математичної моделі вказаної вище електромеханічної системи, яка була б адекватною оригіналу і дозволяла досліджувати як статичні, так і динамічні режими, виникнення яких можливе при роботі електромеханічної системи у вітроенергетичній установці. Така математична модель повинна враховувати взаємний вплив структурних елементів, комутаційні процеси та інші нелінійності схеми, бути оптимальною за швидкодією, з огляду її орієнтації на багатоваріантні розрахунки.

Враховуючи сказане вище, розробка математичних моделей, відповідного програмного забезпечення для системи "вітродвигун - синхронний генератор - перетворювач частоти з ланкою постійного струму - електрична мережа (автономне навантаження) - система автоматичного керування", а також оптимізація структури і параметрів схеми є актуальною науковою задачею.

Метою роботи є:

- створення на основі теорії математичного моделювання електромашинно-вентильних систем математичної моделі вітроенергетичної установки за схемою "вітродвигун - синхронний генератор - перетворювач частоти з ланкою постійного струму - електрична мережа (автономне навантаження) - система автоматичного керування" з оптимальним відбором потужності вітродвигуна;

- стабілізація частоти і напруги на навантаженні;
- виконання циклу математичних експериментів, в використанні розробленого програмного комплексу, стосовно оптимізації структури та параметрів схеми.

Автором захищаються:

- математичні моделі електромеханічної системи вітроенергетичної установки з оптимальним відбором потужності вітродвигуна, стабілізацією частоти і напруги на навантаженні за допомогою інвертора струму як системи рівнянь у фазних і обертових координатах, для дослідження квазіусталених та динамічних режимів роботи;
- спосіб формування моделі електромеханічної системи на основі моделей структурних елементів у обертових координатах в використанні методу вузлових потенціалів;
- алгоритми розв'язування вказаних рівнянь і програмний комплекс, який дозволяє здійснювати математичні експерименти, досліджувати статику і динаміку вітроенергетичної установки;
- спосіб стабілізації частоти синхронним компенсатором в давачем положення ротора на виході інвертора струму при роботі вітроенергетичної установки на автономне навантаження;
- результати досліджень процесів і характеристик вітроенергетичної установки при її роботі на електричну мережу і автономне навантаження.

Наукова новизна.

На єдиній методологічній основі розроблені математичні моделі вітроенергетичної установки з оптимальним відбором потужності вітродвигуна, стабілізацією частоти і напруги на виході інвертора струму для дослідження статики і динаміки, що є новим при розв'язанні подібного класу задач.

Розроблений програмний комплекс для дослідження процесів є новим і оригінальним.

Запропоновано простий і водночас оригінальний спосіб стабілізації частоти на автономному навантаженні за допомогою регулювання напруги збудження синхронного компенсатора в давачем положення ротора.

Результати дослідження вітроенергетичної установки потужністю 1000 кВт, отримані шляхом математичного моделювання, становлять собою наукову новизну.

Практична цінність полягає в наступному:

1. Запропонований спосіб стабілізації частоти інвертора струму дозволяє працювати вітроенергетичній установці в автономному режимі, а також утримувати частоту і напругу при відмиканнях вітроенергетичної установки внаслідок аварії в енергосистемі.

2. Програмний комплекс дозволяє провести цикл математичних експериментів, для вітроенергетичних установок вказаної схеми на різні потужності, що дає можливість оперативно проводити дослідження на етапі проектування, а також вивчати процеси як фахівцями, так і при підготовці фахівців з експлуатації подібних вітроенергетичних систем.

3. Програмний комплекс можна взяти за основу для створення тренажерів з експлуатації вітроенергетичних установок.

4. Результати досліджень використані при проектуванні вітроенергетичної установки потужністю 1000 кВт.

Реалізація і впровадження результатів.

З використанням матеріалів дисертації виконано дві науково-дослідних роботи. Окремі програмні модулі, результати досліджень, виконані шляхом математичного моделювання на ЕОМ, впроваджені у ВНДІЕлектроенергетики і ВНД і ПДІ "Гідропроект" (м. Москва), ВНДІЕмашинобудування (м. Санкт-Петербург), Київському та Львівському політехнічних інститутах, Українському державному лісотехнічному університеті.

Апробація роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались і отримали позитивний відгук на щорічних науково-технічних конференціях Львівського лісотехнічного інституту (тепер Українського державного лісотехнічного університету) в 1987 - 1994 р.р., науковому семінарі з проблем математичного моделювання процесів і оптимізації динамічних кіл і електричних систем з вентильними елементами у Львівському політехнічному інституті (25.05.1989 р.), I Всесоюзній науково-технічній конференції з електромеханотроніки (Ленінград, 1987 р.), V Всесоюзній науково-технічній конференції "Динамічні режими роботи електричних машин і електроприводів" (Каунас, 1988 р.), Всесоюзній науково-технічній конференції до 100 річчя винаходу асинхронного двигуна "Сучасні проблеми електромеханіки" (Москва, 1989 р.), VI Всесоюзній науково-технічній конференції "Динамічні режими роботи електричних машин і електроприводів" (Вішкєк, 1991 р.), Всесоюзній науково-технічній конференції "Проблеми електромашинобудування" (Ленінград, 1991 р.), X Всесоюзній науково-технічній конференції "Інтелектуальні електродвигуни і економія електроенергії" (Суздаль 1991 р.), I Міжнародній науково-технічній конференції "Математичне моделювання в електротехніці й енергетиці" (Львів, 1995 р.).

Публікації. Основні наукові результати за темою дисертації опубліковані в трьох науково-технічних статтях, дев'яти тезах доповідей.

Обсяг і структура роботи. Дисертаційна робота викладена на 305 сторінках машинописного тексту, ілюстрована 144 рисунками і склада-

ється в вступу, трьох розділів, висновків, 167 найменувань бібліографічного списку, 7 додатків.

З М І С Т Р О Б О Т И

У вступі зроблено огляд літератури, в якій описано проблеми і схеми електромеханічного перетворення енергії вітру, методи дослідження керованих електромеханічних систем, сформульовані задачі дослідження.

Різноманітність схем і складність процесів, які відбуваються в керованих електромеханічних системах з напівпровідниковими перетворювачами при наявності різноманітних збурень на валу електричної машини, а також зі сторони споживача, є причиною відсутності на сьогодні єдиної методики дослідження і проектування, незважаючи на те, що вітроенергетика не є новою науковою проблемою.

На основі аналізу літературних джерел для розв'язання сформульованих у дисертації задач дослідження зроблено висновок про доцільність використання теорії математичного моделювання електромашинно-вентильних систем, розробленої д.т.н., професором Плахтиною О.Г., оскільки ця теорія забезпечує єдиний методологічний підхід при аналізі процесів і режимів роботи керованих електромеханічних систем.

В першому розділі описано основні схеми електромеханічного перетворення енергії вітру, дана загальна характеристика вітродвигунів, наведено функціональні схеми вітроенергетичної установки за схемою "перетворювач частоти в ланкою постійного струму - явнопольсна синхронна машина", зосереджено увагу на задачах дослідження і проектування вітроенергетичної установки.

Відомі два види вітроенергетичних установок: працюючих паралельно з енергосистемою; працюючих на автономне (не пов'язане з енергосистемою) навантаження.

Вітродвигуни, які перетворюють енергію вітрових потоків у механічну енергію поділяються на два класи: вітродвигуни з горизонтальною віссю обертання; вітродвигуни з вертикальною віссю обертання.

Регулювання моменту вітродвигуна здійснюється поворотом лопатей за допомогою гідравлічних або електромеханічних систем керування, або зміною його швидкості. В першому випадку частота генератора забезпечується регулюванням моменту, а в другому - частота є змінною.

Електромеханічні системи поділяються на керовані та некеровані і становлять собою традиційну електричну машину, керування якою здійснюється за допомогою напівпровідникових перетворювачів (випрямлячів, інверторів, перетворювачів частоти в ланкою постійного струму,

циклоконверторів), під'єднаних до обмоток статора або ротора.

Застосуванням напівпровідникових перетворювачів розв'язується задача оптимального відбору потужності вітродвигуна, забезпечуються оптимальні режими роботи вітроенергетичних установок.

Функціональна схема вітроенергетичної установки, яка працює паралельно з енергосистемою, подана на рис.1, а силова схема при роботі вітроенергетичної установки на автономне навантаження - на рис.2.

Вітродвигун будемо розглядати як одномасову механічну систему, яка створює момент на валу генератора у вигляді функції

$$M = f(V, \omega, \gamma, \alpha), \quad (1)$$

де M - момент вітродвигуна; V - швидкість вітру; ω - кутова частота вітроколеса; γ - кут повороту ротора; α - кут нахилу лопаті вітроколеса до напрямку вітрового потоку.

Для заданого кута нахилу лопаті при умові, що момент M не залежить від кута повороту ротора, використано сімейство механічних характеристик вітроколеса з вертикальною віссю обертання, отриманих експериментально в аеродинамічній трубі для різних швидкостей вітру. Ці характеристики у вигляді кусково-лінійної інтерполяції функції двох незалежних змінних використовувалися для дослідження і оптимізації параметрів електромеханічної системи. Окремо виконані дослідження для оцінки впливу на електромеханічну систему зміни моменту вітроколеса від кута нахилу лопаті та кута повороту ротора.

Функціональна схема, подана на рис.1, забезпечує розгін вітроколеса з заданим прискоренням, генерування енергії в необхідному розмірі і оптимальним відбором потужності вітродвигуна, а також електричне гальмування з відповідним від'ємним прискоренням.

Вказані режими роботи реалізуються пропорційно-інтегральними регуляторами, які забезпечують керування струму збудження генератора, кута запізнення випрямляча, кута випередження інвертора.

Схема, подана на рис.1, не може працювати при відмиканні від мережі або на пасивне навантаження з огляду на специфіку роботи інвертора струму. Для усунення цієї проблеми пропонується використовувати схему, подану на рис.2, в якій є синхронний компенсатор з давачем положення ротора. В цій схемі синхронний компенсатор виконує дві функції. Перша, основна функція, - забезпечення стабільної частоти на виході інвертора, що здійснюється за допомогою регулятора напруги збудження синхронного компенсатора на основі кутової частоти ротора, яка жорстко зв'язана з частотою навантаження. Напруга, яка подається на обмотку збудження синхронного компенсатора з вказаного регулятора, визначається за формулою

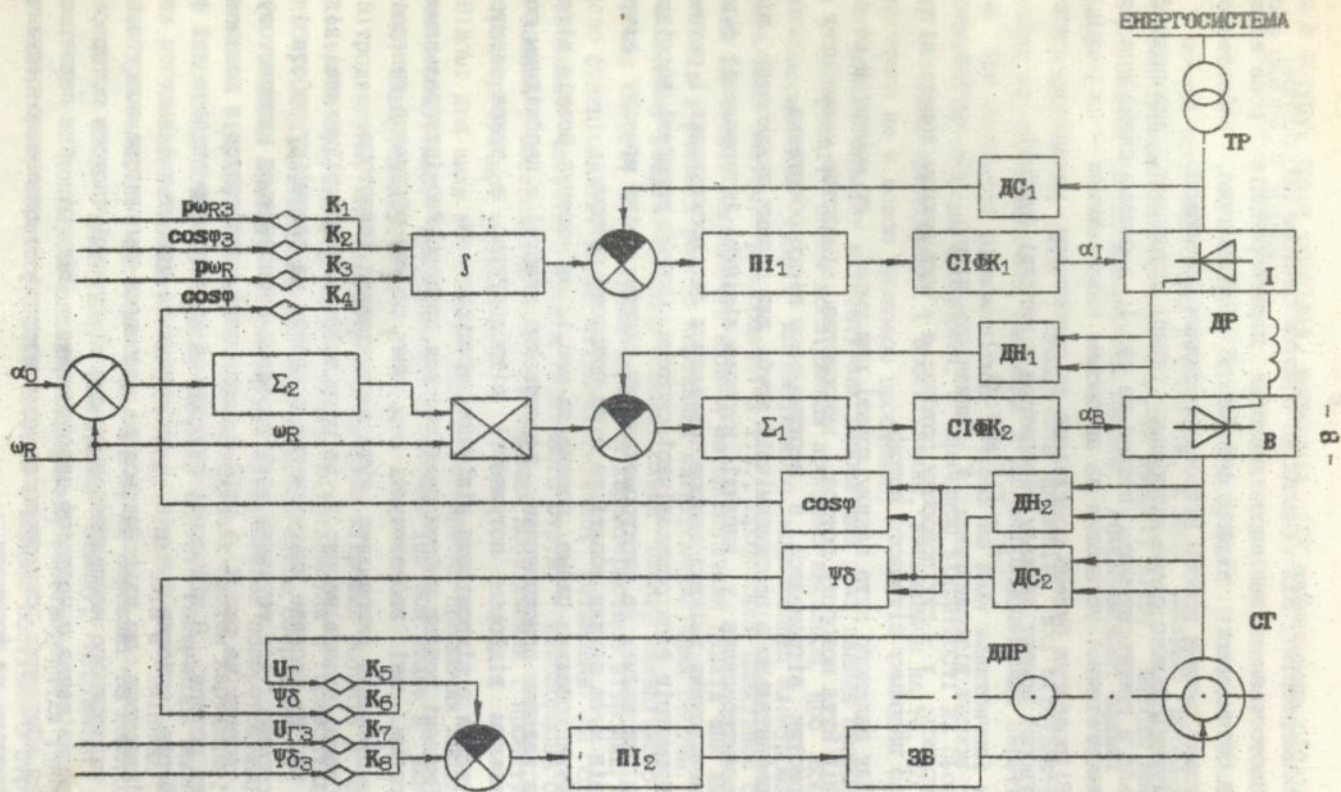


Рис.1. Функціональна схема вітроенергетичної установки, працюючої на енергосистему

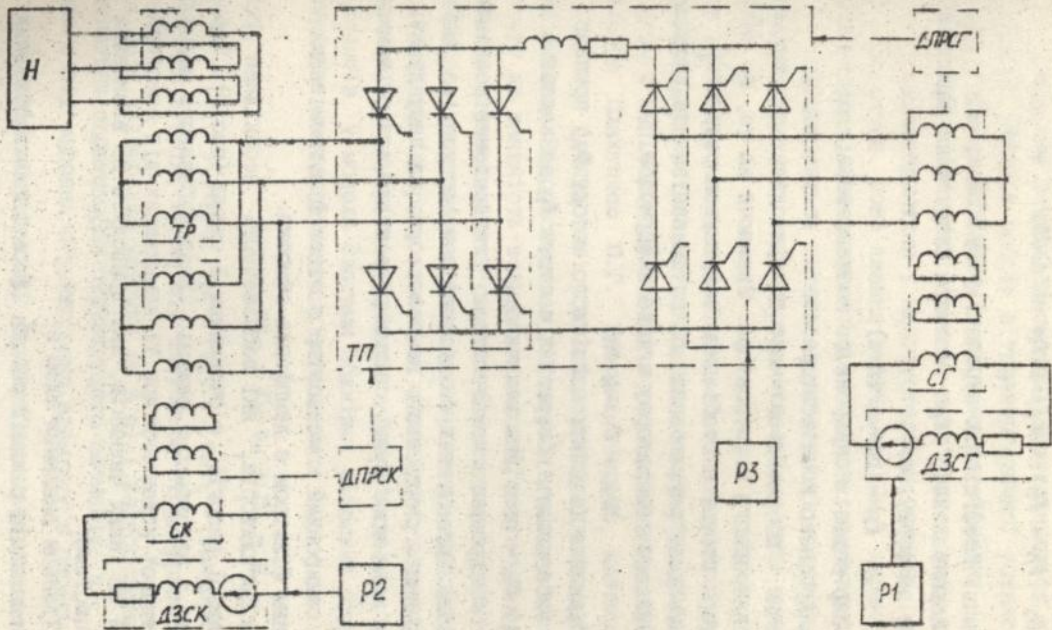


Рис.2. Електрична схема вітроенергетичної установки, працюючої на автономне навантаження; Н - автономне навантаження; ТР - трансформатор; П - тиристорний перетворювач частоти; СГ - синхронний генератор; СК - синхронний компенсатор; ДЗСГ - джерело збудження синхронного генератора; ДЗСК - джерело збудження синхронного компенсатора; ДПРСГ - давач положення ротора СГ; ДПРСК - давач положення ротора СК; P1, P2, P3 - регулятори

$$U_{fCK} = k_f \cdot (f_H - f_3) + k_{uf} \cdot \int_0^t (f_H - f_3) dt, \quad (2)$$

де k_f , k_{uf} - статичні коефіцієнти передачі регулятора; f_3 - задана частота напруги на навантаженні; f_H - частота напруги на навантаженні, яка обчислюється за формулою

$$f_H = p_0 \cdot \omega_R / (2 \cdot \pi), \quad (3)$$

де p_0 - кількість пар полюсів синхронного компенсатора; ω_R - кутова швидкість ротора синхронного компенсатора.

З (2) є очевидним, що зменшення частоти приводить до зниження напруги збудження синхронного компенсатора. Зважаючи на те, що напруга на виході інвертора струму є стабільною за рахунок регулятора напруги, який забезпечує дане регулювання або кутом запізнення випрямляча, або струмом збудження генератора, згідно з формулою

$$U_{CK} = C_K \cdot \omega_R \cdot \Phi_K, \quad (4)$$

зменшення струму збудження (значить магнітного потоку Φ_K) приведе до збільшення ω_R , що забезпечить повернення частоти f_H до заданого значення. В формулі (4) C_K - постійна величина.

Друга функція синхронного компенсатора - генерування реактивної енергії, яка дозволяє проектувати синхронний компенсатор на максимальний $\cos\varphi$. Ця функція синхронного компенсатора, на нашу думку, не є основною, поважк вона може бути успішно розв'язана шляхом вмикання конденсаторів.

Зауважимо, що синхронний компенсатор є також фільтром вищих гармонік, зокрема, таким фільтром є демпферна обмотка.

Рівняння решти регуляторів, які забезпечують необхідний режим генерування реактивної енергії, є очевидним в схеми (рис.2). Вказана схема може працювати в автономному режимі. Вона забезпечує нормальну роботу вітроенергетичної установки при її вимиканнях від енергосистеми внаслідок аварій та інших чинників, які приводять до вимикання установки від енергосистеми.

Задачами дослідження вказаних схем є:

- аналіз і оптимізація режимів роботи (формування необхідних характеристик розгону, генерування енергії і гальмування);
- визначення гармонічного спектру в напругах і струмах з метою усунення їх негативного впливу на енергосистему, навантаження, а також на втрати у вітроенергетичній установці;
- синтез параметрів регуляторів, а в деяких випадках і структури системи автоматичного керування.

Вказані задачі розв'язуються методами математичного моделю-

вання на ЕОМ, чому присвячені другий і третій розділи дисертації.

В другому розділі дисертації розглядаються задачі аналізу квазіусталених режимів роботи вітроенергетичної установки. Наведено математичну модель як замкнуту систему алгебричних, диференціальних, інтегральних і логічних рівнянь, розв'язання яких дозволяє вивчати процеси і характеристики у квазіусталених режимах роботи системи. Описані алгоритми розв'язання задачі на ЕОМ, характеризується програмне забезпечення, яке дозволяє здійснювати математичні експерименти на ЕОМ, обговорюються питання адекватності моделей, наведено результати досліджень квазіусталених режимів і їх аналіз для схем, поданих на рис. 1, 2.

В основу математичної моделі електромеханічної системи вітроенергетичної установки покладена теорія моделювання електромеханічних систем з напівпровідниковими перетворювачами, розроблена д.т.н., професором Плахиною О.Г. За цією теорією, математична модель системи формується на підставі моделей структурних елементів за визначеним алгоритмом. Використання цієї теорії в нашому випадку є оптимальним з огляду на наявність великої кількості структурних елементів і двох схем електромеханічних систем. Структурні елементи (синхронні машини, напівпровідниковий перетворювач частоти, трансформатор, автономне навантаження, джерела живлення обмоток збудження) описуються системою зовнішніх і внутрішніх рівнянь. Для об'єднання моделей структурних елементів у модель системи зовнішні рівняння структурних елементів у матрично-векторному вигляді є такими

$$p\bar{i}_e + \overset{v}{\Gamma}_e \cdot \bar{\varphi}_e + \bar{C}_e = 0, \quad (5)$$

де $\bar{i}_e = (i_1, \dots, i_n)t$, $\bar{\varphi}_e = (\varphi_1, \dots, \varphi_n)t$ - вектори струмів віток і потенціали вузлів, якими під'єднується структурний елемент в систему; $\overset{v}{\Gamma}_e$, \bar{C}_e - відповідно матриця ($n \times n$) і вектор розмірності n , які визначаються параметрами структурного елемента; n - кількість точок можливого під'єднання структурного елемента в системі.

При відомому векторі $\bar{\varphi}_e$ розв'язується система рівнянь структурного елемента. Вектор потенціалів $\bar{\varphi}_e$ визначається на підставі розв'язання рівняння

$$\overset{v}{\Gamma}_c \cdot \bar{\varphi}_c + \bar{C}_c = 0 \quad (6)$$

відносно вектора $\bar{\varphi}_c$ і далі за формулою

$$\bar{\varphi}_{e_j} - \overset{v}{P}\varphi_j \cdot \bar{\varphi}_c = 0, \quad (j=1, \dots, m), \quad (7)$$

$$\text{де } \bar{G}_C = \sum_{j=1}^m \bar{P}_j \cdot \bar{G}_{e_j} \cdot \bar{P}_j^T, \quad \bar{C}_C = \sum_{j=1}^m \bar{P}_j \cdot \bar{C}_{e_j}; \quad (8)$$

m - кількість структурних елементів; \bar{Y} - матриця інциденцій (під'єднань структурного елементу в системі); \bar{Y}^T - матриця, транспонована по відношенню до матриці \bar{Y} ; $\bar{\varphi}_C$ - вектор потенціалів незалежних вузлів системи, точок під'єднання структурних елементів в системі; \bar{G}_C, \bar{C}_C - матриця і вектор вузлового векторного рівняння електромеханічної системи.

Математична модель синхронної машини формується на підставі рівнянь Парка, перетворених до фазової системи координат з використанням каталожних даних. Каталожні дані є параметрами синхронної машини, розрахованої для номінального режиму, тобто електромагнітні параметри є насиченими. Використання такої моделі синхронної машини обґрунтовується наявністю регулятора, який підтримує постійним робочий магнітний потік. Використання такої моделі для синхронного компенсатора, за допомогою якого регулюється частота струмом збудження, а значить магнітним потоком, є обмеженим.

Математична модель перетворювача частоти в ланкою постійного струму формується на основі рівнянь Кірхгофа, записаних для всіх віток, при умові, що тиристори еквівалентуються послідовно з'єднаними активними опорами і індуктивностями, які є змінними, тобто, тиристорний перетворювач частоти розглядається як схема з постійною структурою і змінними параметрами.

Моделі трансформатора, навантаження, джерел живлення обмоток збудження синхронних машин формується на підставі законів Кірхгофа. Всі моделі приведені до вигляду, в якому виділені зовнішні рівняння (5), що дозволяють формувати модель силової схеми електромеханічної системи вітроенергетичної установки.

Система керування описується згідно з структурою функціональної схеми (рис.1) і подається системою диференціальних рівнянь.

До описаних рівнянь додається рівняння механічної рівноваги, в результаті - отримана система рівнянь є замкнутою, вона може бути розв'язана, в результаті чого - розраховані процеси, які протікають в електромеханічній системі вітроенергетичної установки.

Враховуючи, що програми складаються з окремо відпрацьованих модулів структурних елементів і модулів загального характеру, цікавим є алгоритм основного модуля, який об'єднує окремі програмні модулі в **один ціле**.

Результатами досліджень є розрахункові залежності від часу всіх змінних, які входять у повну систему рівнянь, а також їх інтегральний аналіз. Результати досліджень засвідчують працездатність вітроенергетичної установки в усталеному режимі при паралельній роботі з енергосистемою і при роботі на автономне навантаження, а також правильність відзначених моделей для аналізу описаного класу задач.

Як приклад, на рис.3а. подані розрахункові залежності від часу лінійних напруг автономного навантаження, а на рис.3б. - просторова гістограма інтегрального аналізу напруг автономного навантаження.

Результати математичного моделювання і окремих експериментальних досліджень підтвердили адекватність математичної моделі.

В третьому розділі розв'язуються задачі дослідження динамічних режимів роботи вітроенергетичної установки. Описані математичні моделі структурних елементів і моделі електромеханічної системи, призначені для розрахунку динамічних режимів роботи, подано опис алгоритму розв'язання задачі на ЕОМ, дана характеристика програмному забезпеченню, обговорюються питання адекватності математичних моделей, подано результати досліджень динамічних режимів і їх аналіз.

До динамічних режимів роботи в дисертації віднесено запуск, гальмування, робота при змінах швидкості вітру, скачкоподібне збільшення та зменшення навантаження.

Зважаючи на широкий діапазон сталих часу в системі, наявність швидкої зміни е.р.с. електричних машин і перемикання тиристорів перетворювача частоти, розв'язувати задачі дослідження динамічних режимів з використанням описаних моделей у фазних координатах на сьогодні є практично неможливим. Тому, для дослідження динаміки, нами застосовано перетворення координат і прийняті деякі додаткові допущення, які, практично не зменшуючи адекватності моделі в сенсі отримуваної інформації, дозволяють значно збільшити швидкість математичних моделей, довести їх до рівня, на якому можливо не тільки проводити аналіз процесів, а також ітераційний синтез параметрів системи.

Перетворення координат зроблено таким чином, щоб усі величини, які входять в систему рівнянь для усталеного режиму, були постійними. Таке перетворення електромеханічної системи в цілому є можливим, якщо використати рівняння напівпровідникового шестипульсного моста в обертових координатах, подані в монографії д.т.н., професора Плахтини О.Г. "Математическое моделирование электромашинно-вентильных систем":

$$\begin{aligned} 2M_d \cdot \varphi_d + 2M_q \cdot \varphi_q - M_0 \cdot u_R - 2r_B \cdot i_R &= 0, \\ \Delta M_d \cdot i_R - 3M_0 \cdot i_d &= 0, \quad \Delta M_q \cdot i_R - 3M_0 \cdot i_q &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

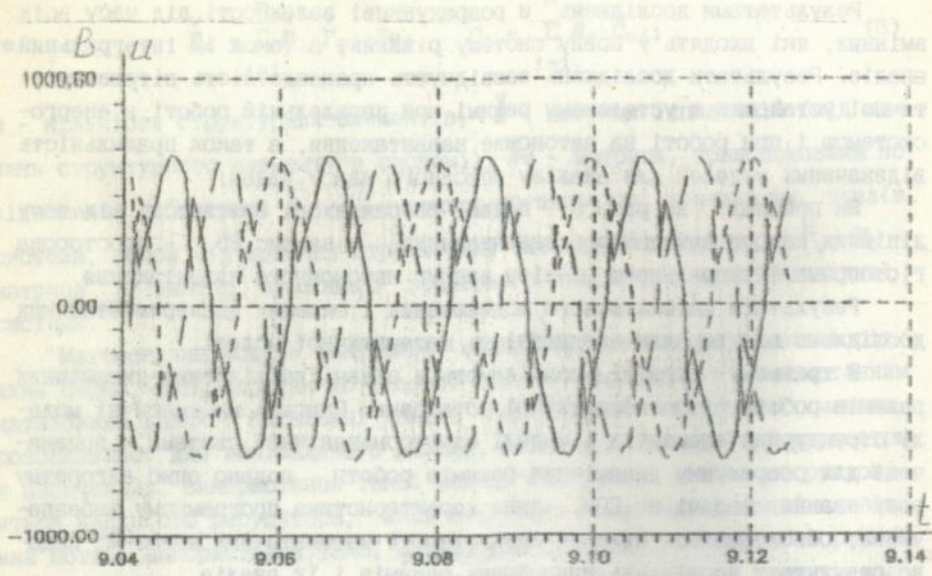


Рис.3а. Розрахункові залежності від часу лінійних напруг автономного навантаження (u_{AB} , u_{BC} , u_{CA}).

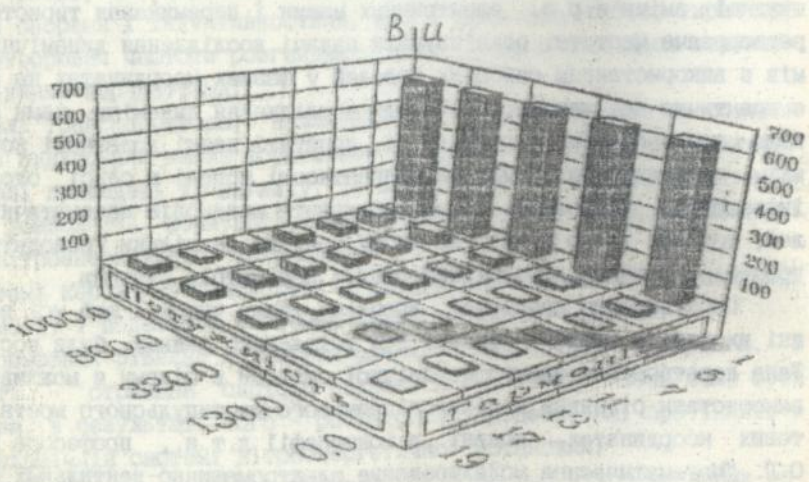


Рис.3б. Просторова гістограма інтегрального аналізу напруг автономного навантаження

$$\begin{aligned} \text{де} \quad U_d &= (3/2\pi) \cdot [\sin(\alpha + 2\pi/3 + \gamma_K) - \sin(\alpha)], \\ U_q &= (3/2\pi) \cdot [\cos(\alpha) - \cos(\alpha + 2\pi/3 + \gamma_K)], \\ U_0 &= 3 \cdot U_0 = 1 + 3 \cdot \gamma_K / (2\pi) \end{aligned} \quad (10)$$

- параметри трифазного шестипульсного напівпровідникового перетворювача в координатах d, q , які визначаються на основі α - кута керування, який рахується від початку системи координат, γ_K - кута комутації вентилів. Змінні, які входять в (9), мають наступний зміст: Φ_d, Φ_q - потенціали тиристорного перетворювача зі сторони змінного струму в обертових координатах; u_R - напруга зі сторони постійного струму; i_d, i_q - струми в осях d і q ; i_R - випрямлений струм.

Кут α визначається системою автоматичного керування, а кут γ_K розраховується шляхом розв'язання диференціальних рівнянь, які описують контур комутації при допущенні, що за час комутації струм i_R є постійною величиною. Наведені в (10) параметри враховують нульову і першу гармонічні складові функцій стану вентилів, які відповідають перетворенню перших гармонічних складових напруг і струмів відповідно у випрямлені напруги і струми.

Очевидно, що при використанні рівнянь (9), синхронний генератор, під'єднаний до випрямляча, варто подати рівняннями Парка. Інвертор зі сторони мережі також описується рівняннями (9), при умові, що до нього під'єднано компенсатор, поданий рівняннями Парка. При відсутності синхронного компенсатора рівняння (9) є поданими в координатах X, Y де X - відповідає ординаті d , а Y - ординаті q . Система координат X, Y умовно обертається з кутовою частотою напруги мережі. Виходячи з цього, трансформатор, мережа і автономне навантаження, описуються в координатах X, Y . Решта структурних елементів описано тими ж рівняннями, що і у моделях, поданих у другому розділі.

Зважаючи на те, що у вітках напівпровідникового перетворювача немає інерційних елементів, їх зовнішнє рівняння зводиться до вигляду

$$\bar{I}_e + \bar{I}_e \cdot \bar{\Phi}_e + \bar{C}_e = 0, \quad (11)$$

яке відрізняється від зовнішнього рівняння (5) відсутністю похідних струмів віток. Тому, з метою забезпечення універсальності формування моделей системи, на основі моделей структурних елементів, отримано систему зовнішніх рівнянь у вигляді:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{C11} \cdot \bar{\Phi}_C - \sum_{j=n+1}^m \bar{H}_j \cdot p \bar{I}_{e_j} + \bar{C}_{C1} = 0, \\ \bar{I}_{C21} \cdot \bar{\Phi}_C + \bar{C}_{C2} = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{де } \Gamma_{C11} &= \sum_{j=1}^n \bar{H}_j \cdot \bar{G}_{e_j} \cdot \bar{H}_{\varphi_j}, & \Gamma_{C21} &= \sum_{j=n+1}^m \bar{H}_j \cdot \bar{G}_{e_j} \cdot \bar{H}_{\varphi_j}, \\ \bar{C}_{C1} &= \sum_{j=1}^n \bar{H}_j \cdot \bar{C}_{e_j}, & \bar{C}_{C2} &= \sum_{j=n+1}^m \bar{H}_j \cdot \bar{C}_{e_j} - \sum_{j=1}^n \bar{H}_j \cdot \bar{I}_{e_j}. \end{aligned} \quad (13)$$

Система рівнянь (12) розв'язується відносно $\bar{\varphi}_C$, \bar{I}_{e_j} ($j = n+1, \dots, m$).

З використанням системи рівнянь (12) алгоритм розв'язування задачі на ЕОМ набуває форми, описаної в розділі 2. Таким чином, як моделі у фазних координатах, так і моделі в обертових координатах мають однаковий алгоритм розв'язування на ЕОМ. Звідси випливає, що програмний комплекс для дослідження динамічних режимів за своєю структурою є подібним до програмного комплексу для дослідження квазіусталених режимів роботи.

Перевірка адекватності моделей в обертових координатах здійснена шляхом порівняння результатів, отриманих моделюванням у фазних і обертових координатах.

За допомогою моделювання в обертових координатах зроблено:

- синтез параметрів регуляторів для вітроенергетичної установки ВДД-1000 потужністю 1000 кВт, враховуючи вимогу виконання технічного завдання по запуску, режиму генерування, гальмування, забезпечуючи оптимальний відбір потужності вітродвигуна;
- оцінено реакцію електромеханічної системи вітроенергетичної установки на зміну швидкості вітру за осцилограмою зміни швидкості вітру, переданою гідрометцентром;
- проаналізовано протікання процесів у системі при роботі вітродвигуна з врахуванням зміни моменту як функції кута повороту ротора;
- перевірено реакцію системи на критичні пориви вітрового потоку, зміну навантаження;
- вивчено роботу вітроенергетичної установки в аварійних режимах.

В додаток і подано тексти програм, які представляють моделі у фазних і обертових координатах, інструкції в експлуатації розроблених програм, а також документи, які підтверджують впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

За результатами дисертаційної роботи можна зробити такі основні висновки:

1. На підставі результатів вивчення процесів у керованих електромеханічних системах з напівпровідниковими перетворювачами і методів дослідження таких систем, запропоновано оригінальний спосіб дослідження електромеханічної системи вітроенергетичної установки з оптимальним відбором потужності вітродвигуна, стабілізацією напруги і частоти методами математичного моделювання. Запропонований спосіб дозволяє досліджувати статичні і динамічні режими, оптимізувати параметри і структуру схеми.

2. На основі теорії математичного моделювання електромеханічних систем з напівпровідниковими перетворювачами, для реалізації згаданого способу дослідження, розроблені математичні моделі структурних елементів: явнополюсної синхронної машини, керованого напівпровідникового перетворювача частоти з ланкою постійного струму, трансформатора, активно-індуктивно-емнісного навантаження, електричної мережі, джерела живлення обмотки збудження синхронної машини, системи автоматичного керування у різних варіантах її схемної структури, з яких можливе формування математичних моделей системи.

3. З врахуванням рівняння механічної частини вітродвигуна, моделей структурних елементів, за єдиним, універсальним алгоритмом сформовані моделі системи у фазних координатах, для дослідження квазіусталених і в обертових координатах - для дослідження динамічних режимів роботи.

4. Розроблено програмний комплекс і ряд сервісних програм, які дозволяють проводити математичні експерименти фахівцям, не вдаючись до елементів програмування.

5. За результатами досліджень запропоновано схему електромеханічної системи з паралельним під'єднанням до інвертора струму синхронного компенсатора в давачем положення ротора. Регулювання збудження компенсатора дозволяє стабілізувати частоту на виході інвертора, що уможливило роботу системи "синхронний генератор - перетворювач частоти з ланкою постійного струму (на основі інвертора струму) - автономне навантаження".

6. За допомогою програмного комплексу виконано цикл досліджень квазіусталених і динамічних режимів роботи вітроенергетичної установки, результати яких використані при проектуванні вітроенергетичної установки потужністю 1000 кВт - ВД-1000.

7. Доведено, що математичні моделі є адекватними оригіналу, тоб-

то, вони мають застосування як при вивченні готових схем, так і на стадії їх проектування.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Науково-технічні статті:

1. Плахтіна Е.Г., Шакарян Ю.Г., Рудий Т.В. и др. Математическая модель для исследования динамических режимов ветроэнергетической установки. - Электричество, N12, 1991. - С.9-15.

2. Рудий Т.В. Математична модель для дослідження електромеханічних процесів вітроенергетичної установки. - В кн.: Науковий вісник. Вип. 2. - Львів, УкрДІТУ, 1994. - С.132-140.

3. Плахтіна О.Г., Рудий Т.В. Схема і результати дослідження вітроенергетичної установки при генеруванні енергії на автономне навантаження. - В кн.: Науковий вісник. Вип. 3. - Львів, УкрДІТУ, 1995. - С.88-95.

Тези доповідей:

4. Поляга Л.Н., Рудий Т.В., Гаранджа С.А. Об опыте эксплуатации математической модели тиристорного преобразователя частоты со звеном постоянного тока в координатах d , q , 0 и амплитуд гармонических составляющих. В кн.: Тезисы докладов I Всесоюзной научно-технической конференции по электромехатронике. - Ленинград, 1987. - С.54-56.

5. Поляга Л.Н., Рудий Т.В., Муамча И.Н. Математическая модель и результаты исследований переходных процессов явнопольной синхронной машины, питаемой от инвертора тока. В кн.: Динамические режимы работы электрических машин и приводов./ Тезисы докладов V Всесоюзной научно-технической конференции. - Каунас, 1988. - С.78-79.

6. Васильев К.Н., Рудий Т.В., Гаранджа С.А. Математическая модель автономного электропривода: явнопольный синхронный генератор - циклоконвертер мостового типа - явнопольный синхронный двигатель. - В кн.: Современные проблемы электромеханики./Тезисы докладов Всесоюзной конференции к 100 летию изобретения трехфазного асинхронного двигателя. Часть I. - Москва: МЭИ, 1989. - С.203-204.

7. Васильев К.Н., Дячовин В.В., Рудий Т.В. Автоматизированная система моделирования статических характеристик вентильных двигателей. - В кн.: Вентильные электромеханические системы с постоянными магнитами. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. - Москва, 1989. - С.47.

8. Плахтіна Е.Г., Данилевич Я.В., Рудий Т.В. Програмное обеспечение для исследования динамических режимов синхронных машин, работающих совместно с тиристорными преобразователями в ветроенергетических

установках. - В кн.: Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов./ Тезисы докладов VI Всесоюзной научно-технической конференции. - Бишкек, 1991. - С.31-32.

9. Платина Е.Г., Данилевич Я.В., Рудый Т.В. и др. Автономные электроэнергетические системы по схеме: "Синхронный генератор - тиристорный преобразователь частоты". Методы и результаты исследований. В кн.: Проблемы электромашиностроения./ Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. - Ленинград, ВНИИЭлектромаш, 1991. - С.24-25.

10. Платина Е.Г., Шабарова А.В., Рудый Т.В. Исследования вентильных электрических машин. В кн.: Интеллектуальные электродвигатели и экономия электроэнергии./ Тезисы докладов X Всесоюзной конференции. - Суздаль, 1991.

11. Шабарова А.В., Рудый Т.В. Разработка и исследование динамических режимов работы ветроэнергетической установки на базе управляемой явнополюсной синхронной машины мощностью 250 кВт. В кн.: Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов./ Тезисы докладов VI Всесоюзной научно-технической конференции. Ч2. - Бишкек, 1991. - С.46.

12. Василів К.М., Рудий Т.В. Математична модель генератора автономної вітроенергетичної устави. В кн.: Математичне моделювання в електротехніці й енергетиці./ Теми доповідей I Міжнародної науково-технічної конференції. - Львів, 1995. - С.117-118.

S U M M A R Y

Roudy T.V.

Study of a wind power-plant system with optimum take off of a wind engine and frequency stabilization at the output of a current inverter by means of the methods of mathematical modelling of an electromechanical system

Dissertation for a scientific degree of a candidate of technical sciences, speciality 05.09.03. - electrotechnical complexes and systems, including their control and regulation, State University "Lvivs'ka Politechnika", Lviv, 1996.

Manuscript is defended the essence of which has been reflected in 12 scientific works and which contains theoretical and experimental investigation of electromechanical systems of wind power-plants according to a scheme: "synchronous generator - frequency convertor with a link of constant current - an automatic control system", working both in parallel with electric network and for an autonomous load. Mathematical models, algorithms and program

144040

complexes have been developed, complex operation modes have been carried out. Method of frequency and voltage stabilization at the current inverter output by means of a synchronous compensator with a sensor of the rotor situation has been proposed. Method of a system model formation on the basis of the models of structural elements for the dynamic operation modes' study has been worked out.

АННОТАЦІЯ

Рудий Т.В.

Исследование методами математического моделирования электромеханической системы ветроэнергетической установки с оптимальным отбором мощности ветродвигателя и стабилизацией частоты на выходе инвертора тока.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03. - электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование, Государственный университет "Львівська політехніка", Львов, 1996.

Защищается рукопись, сущность которой отображена в 12 научных трудах и содержит теоретические и экспериментальные исследования электромеханических систем ветроэнергетических установок по схеме: "синхронный генератор - преобразователь частоты со звеном постоянного тока - система автоматического управления", работающих как параллельно с электрической сетью, так и на автономную нагрузку. Разработаны математические модели, алгоритмы и программные комплексы, выполнен комплекс исследований установившихся и динамических режимов работы. Предложен способ стабилизации частоты и напряжения на выходе инвертора тока с помощью синхронного компенсатора с датчиком положения ротора. Разработан способ формирования модели системы на основании моделей структурных элементов для исследования динамических режимов работы.

Ключові слова: електромеханічна система, вітроенергетична установка, перетворювач частоти з ланкою постійного струму, синхронний компенсатор, система автоматичного керування, математична модель, алгоритми, програма, ЕОМ.