

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Ігоря Сікорського»

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

САНДОВАЛ ЗАРХІ КАРЛОС РОЛАНДО

УДК 621.548

ДИСЕРТАЦІЯ

РЕЖИМИ РОБОТИ АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ З
АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ В МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВАХ
ЕКВАДОРУ

05.14.08 – перетворювання відновлюваних видів енергії

Технічні науки

Подається на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Сандовал Зархі К.Р.

Науковий керівник Головка Володимир Михайлович, д.т.н., проф.

КИЇВ – 2017

АНОТАЦІЯ

Сандовал Зархі К.Р. Режими роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором в метеорологічних умовах Еквадору – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.08 «Перетворювання відновлюваних видів енергії» Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ, 2017.

Дисертація присвячена вирішенню питань використання вітрового потенціалу республіки Еквадор для енергопостачання у віддалених районах країни. В роботі аналізується можливість використання автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором для забезпечення електроенергією споживачів, що живуть у даних місцевостях республіки. Використання автономних систем ВЕУ в даних районах можуть пришвидшити електрифікацію, а це, відповідно, підвищить рівень життя населення та дасть поштовх для розвитку місцевості.

Мета дисертації полягає у визначенні режимів роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором в метеорологічних умовах Еквадору.

Проведено аналіз та визначення місць розташування з точки зору експлуатаційної та економічної доцільності використання автономних вітроелектричних установок з асинхронним генератором. Також проведено порівняльний аналіз режимів роботи генераторного обладнання, що входить до складу вітроелектричних установок, за дослідженнями таких вчених, як Іванов А.А., Ліщенко А.І., Лісник В.Я., Мазуренко Л.І., Васько П.Ф., Вишневський Л.В., Бохян С.К., Радін В.І., Торопцев Н.Д., Джендубаєв А-З.Р. та ін. Проаналізовано енергоспоживання у всіх районах Еквадору і встановлено, що середнє споживання домогосподарства складає 2,3 кВт·год/доб, і цей показник з часом буде зростати. Вперше проведена науково обґрунтована оцінка

вітроенергетичного потенціалу республіки Еквадор що дало можливість визначити, що найбільш перспективні місцевості з високим потенціалом знаходяться в гірському районі для розташування вітроелектричних автономних установок, де середньорічна швидкість вітру на висоті 20 м досягає від 4 до 7 м/с, а питома потужність вітрового потоку - $33,4 - 167,6 \text{ Вт/м}^2$.

Проведено аналіз конструкційних схем автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором, яка, залежно від їх компоновки, може працювати окремо або паралельно на споживача.

За допомогою орієнтованих графів розглянуто алгоритм функціонування даної системи як сукупність залежностей, що визначає необхідне виконання заданого процесу забезпечення енергією споживача. Тоді забезпечення споживача проходить таким чином: схема а - забезпечення споживача проходить за величини потоку знаходження енергії вітру, більшої за потік потреб енергії споживача; схема б - за величини потоку потреб енергії споживача, більшої за потік знаходження енергії вітру, то забезпечення проходить за рахунок накопиченої енергії акумулятором; схема в - забезпечення споживача проходить за двома взаємопов'язаними каналами (перший – схеми а та другий – схеми б) за досить високої величини потоку знаходження енергії вітру йде забезпечення споживача та зарядження акумуляторного блоку. Після аналізу енергозабезпечення споживача від даних систем за допомогою положень теорії масового обслуговування встановлено, що необхідно застосовувати двоканальні схеми для підвищення коефіцієнту заповнення графіка навантаження споживача.

Розроблена та проаналізована математична модель в системі «вітроагрегат – асинхронний генератор – споживач». Аналіз параметрів, що впливають на режим роботи системи ВЕУ, проведено за допомогою критерію Гурвиця умовами стійкості, за якими є необхідність та достатність всіх діагональних мінорів визначника, що складається з коефіцієнтів характеристичного рівняння, бути більше нуля, тобто співпадати за знаком з першим коефіцієнтом даного рівняння. Запас стійкості буде характеризуватися вільним членом характеристичного рівняння, який залежить тільки від динамічних властивостей складових ланок, що

свідчить про необхідність передбачати застосування буферних елементів. Оскільки в автономній ВЕУ з АГ завжди існує дефіцит реактивної енергії, то необхідно передбачити можливість здійснення її компенсації при наростанні навантаження або коливання рівня швидкості вітру. Таким чином, дана модель дозволяє визначити чинники та їх поєднання, що впливають на стійкість системи. Чисельне значення їх доцільно провести на базі імітаційного моделювання режимів роботи автономної вітроелектроустановки. Розроблена математична модель системи «вітроагрегат – асинхронний генератор – споживач» та проведено її аналіз на базі критерію Гурвиця, що дозволив визначити характер протікання динамічних процесів, які впливають на її стійкість за зміни швидкості вітру.

Виконана розробка імітаційної моделі для дослідження режимів роботи автономної вітроелектричної системи з АГ, що дозволила спостерігати та аналізувати наступні характеристики генератора: швидкість ротора, електромагнітний момент, механічний момент, зміни напруги та струму при зміні навантаження та швидкості вітру. Розроблено імітаційну модель автономної вітроустановки з асинхронним генератором для визначення її параметрів режиму роботи, встановлено, що послідовне приєднання навантаження повинно проводитися з витримкою часу для проходження перехідного процесу з приєднанням блоку конденсаторів відповідної ємності.

Проведено аналіз використання системи АВЕС, при використанні інверторів змінного струму до постійного для зарядження акумуляторної батареї від вітроагрегату, оскільки найбільш складною задачею для роботи ВЕУ є регулювання напруги та частоти під впливом зміни швидкості вітру та утримання показників в робочому режимі, запобігання аварійним ситуаціям. Виконана розробка імітаційної моделі, за допомогою якої аналізується режим роботи ВЕУ, що працює з імпульсним перетворювачем на зарядження акумуляторної батареї (навантаження). Така схема передбачає покращення умов роботи ВЕУ за рахунок зменшення компенсації реактивної потужності від додаткового блоку конденсаторів, непрямого підключення до споживача, що у свою чергу спрощує

схему системи для регулювання напруги та частоти, і за умови покращення підтримки жорсткості характеристики генератора. Отримано патент України на корисну модель пристрою для зарядження акумуляторних батарей, що має за мету створення даного зарядного пристрою, в якому за рахунок приєднання до вихідних клем стабілізатора напруги послідовного ланцюга, що складається з транзисторного ключа з системою управління, датчика струму і акумуляторної батареї, значно розширюється діапазон відбору енергії від асинхронного генератора вітроустановки за широкого діапазону його обертання з контролем споживаного струму, що підвищує ефективність процесу зарядження акумуляторної батареї. Таким чином, в порівнянні з прототипом пропонується пристрій дозволяє контролювати навантаження асинхронного генератора при різній швидкості обертання ротора і величині зарядного струму акумуляторної батареї, що відповідає стану батареї і величині вхідної напруги. Все перераховане вище дозволяє отримати новий технічний результат - підвищити ефективність зарядного процесу акумуляторної батареї і підвищити величину відбирання енергії від вітроустановки при широкому діапазоні зміни обертання ротора генератора.

Розроблено імітаційну модель автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором з підключенням імпульсного перетворювача для зарядження акумуляторних батарей. Встановлено, що під час регулювання шпаруватості сигналу від 0,1 до 0,9, можливе максимальне використання енергії вітру, що перетворюється асинхронним генератором. Таким чином, набув подальшого розвитку науковий підхід визначення режимів роботи автономних вітроелектроустановок з асинхронним генератором за змінних: частоти обертання ротора вітроустановки та параметрів навантаження і при використанні імпульсного перетворювача для зарядження акумуляторних батарей на базі імітаційного моделювання, що, на відміну від відомих, дозволяє отримати параметри системи за умов її стійкості.

Проведені стендові дослідження роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором підтвердили теоретичні дослідження

роботи. Порівняльний аналіз експериментальних результатів та тих, що отримані моделюванням, показує, що величина розбіжності знаходиться в межах 7 %.

Проведені стендові дослідження роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором при використанні імпульсного перетворювача для зарядження акумуляторних батарей демонструють, що при порівняльному аналізі експериментальних результатів та тих, що отримані моделюванням при зміні шпаруватості від 0,2 до 0,9, асинхронна машина не втрачає генераторний режим при зміні швидкості вітру в діапазоні 0,95–0,75 % від номінального значення. Розбіжність значень, що отримані експериментальним шляхом і за моделлю, складає від 2 до 4%, що свідчить про адекватність моделі.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробленні методики та визначенні вітроенергетичного потенціалу республіки Еквадор з умов використання автономних вітроелектричних установок; розробленні методики на базі імітаційного моделювання вітроелектричних автономних установок з асинхронним генератором для визначення режимів її роботи при сталих та змінних швидкостях вітру; розробленні методики на базі імітаційного моделювання вітроелектричних автономних установок з асинхронним генератором для визначення режимів її роботи при використанні імпульсного перетворювача для зарядження акумуляторних батарей.

Результати досліджень використані в Інституті відновлюваної енергетики НАН України в рамках виконання науково-дослідної роботи та в навчальному процесі і наукових дослідженнях кафедри електропостачання ім. проф. В.М.Синькова ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України.

Ключові слова: вітроенергетика, вітроелектроустановка, стійкість автономних вітроелектричних систем, асинхронний генератор, імітаційне моделювання, імпульсний перетворювач, зарядження акумуляторної батареї.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Сандовал З.К. Аналіз потоків енергії вітру республіки Еквадор / К.З. Сандовал // Відновлювана енергетика. – 2015. – №3. – С.48–52.

2. Головка В.М. Аналіз компоновки автономних вітроелектричних систем з асинхронним генератором / В.М. Головка, В.П. Коханевич, М.О. Шихайлов, Т.В. Зінченко, З.К. Сандовал // Відновлювана енергетика. – 2015. – №4. – С. 37 – 40.

3. Головка В.М. Имитационная модель для анализа параметров автономных ветроэлектрических установок с асинхронным генератором / В.М. Головка, В.П. Коханевич, Н.А. Шихайлов, К. Сандовал, А.М. Донец // Альтернативная энергетика и экология. – 2017. – №4. – С. 42-52. doi:10.15518/isjaee.2017.04-06.042-052

4. Головка В.М. Аналіз режимів роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором з використанням імпульсного пристрою для зарядження акумуляторних батарей на базі імітаційного моделювання / В.М. Головка, В.П. Коханевич, М.О. Шихайлов, К. Сандовал // Відновлювана енергетика. – 2017. – № 2. – С. 63–74.

5. Головка В.М. Порівняльний аналіз експериментальних та результатів імітаційного моделювання роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором з використанням імпульсного пристрою для зарядження акумуляторних батарей / В.М. Головка, К. Сандовал // Енергетика і автоматика. – 2017. – № 2 (32). – С. 153–160. – Режим доступу до журн.: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/8781>

6. Головка В.М. Стійкість автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором / В.М. Головка, К. Сандовал // Енергетика та електрифікація. – 2017.-№ 3 . – С. 20–21.

Наукові праці які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Головка В.М. Автономна вітроелектрична системи з асинхронним генератором: аналіз компоновки / В.М. Головка, В.П. Коханевич, Н.А. Шихайлов, Т.В. Зінченко, К. Сандовал // XVI Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Київ, 2015.– С.240–241.

2. Сандовал К.Р. Імітаційна модель для аналізу параметрів автономних вітроелектричних установок з асинхронним генератором / К.Р. Сандовал // III Міжнародна науково-технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками». – Вінниця, 2015. – С. 48.

3. Головка В.М. Імітаційне моделювання режимів роботи паралельно увімкнених вітроустановок з асинхронними генераторами на автономне навантаження / В.М. Головка, Н.А. Шихайлов, Т.В. Зінченко, К. Сандовал // XVII Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Київ, 2016. – С.407–409.

Наукові праці які додатково відображають наукові результати дисертації:

1. Головка В.М. Пристрій для зарядження акумуляторних батарей / В.М. Головка, В.П. Коханевич, М.О. Шихайлов, В.Б. Павлов, В.Є. Павленко, К.Р. Сандовал // Патент на корисну модель №. 117122 Україна. МПК F03D,9/00 H02j7/00 №u201403991; Заявл.10.02.17. Опубл.12.06.17, Бюл.№11, 2017 р.

ABSTRACT

Sandoval C.R. Operation Modes of stand-alone wind turbine with induction generator in meteorological conditions of Ecuador. Manuscript

The Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering Science, speciality 05.14.08 “The transformation of renewable energy”, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Institute of Renewable Energy NASU, Kyiv, 2017.

The thesis deals with the use of wind potential of the Republic of Ecuador to power supply far away areas of the country. This work analyzes the possibility of using stand-alone wind power systems with induction generator to provide with electrical energy to consumers living in remote areas. Stand-alone wind turbines systems WT in these regions might speed up electrification, which, will increase the living standards of the population and give conditions to develop that region.

The aim of the thesis is to determine the modes of operation of stand-alone wind turbine system with induction generator in meteorological conditions of Ecuador.

The analyze and determination of the location in terms of economic and operational feasibility using the stand-alone wind turbine unit with induction generator were carried out. Also has been done a comparative analysis of the operating modes of the generator equipment part of the wind turbine unit, which has been researched by many scientists such as Ivanov A.A., Lyshenko A.I., Lisnyk B.Y., Mazurenko L.I., Basko P.F., Bishebskyi L.B., Bohyan C. K, Radin B.I., Toropets N.D., Dshendubayeb A-ZR and others. The energy consumption in all areas of Ecuador is analyzed and it is estimated that the average household consumption is 2,3 kWh/day, and this indicator will increase next years. For the first time, a scientific based assessment of the wind energy potential of the Republic of Ecuador is made, which has given the possibility to determine that the most promising areas with high potential are in the mountain region to be located the wind-power autonomous units, where the average annual wind speed at a height of 20 m reaches from 4 to 7 m / s, and the specific the power of the wind stream is 33.4 - 167.6 W / m².

The analyze of structural schemes of a stand-alone wind power plant with induction generator were carried out, which, depending on their layout, can work without or in parallel to the consumer or also called active load.

Applying the graph theory -with the help of the oriented graph is studied the algorithm of the structural schemes of a stand-alone wind power plant systems as a set of dependencies, which determines the implement of a process, that provide with energy to the consumer. Then provide to the consumer passes through the next layouts: the layout a) - provide to the consumer passes if the amount of the flow of wind energy is more than the flow of consumer energy needs; the layout b) - if the amount of the flow of consumer energy needs is more than the flow of wind energy, then the provision passes through of accumulate energy in the battery system; the layout c) - provide the consumer passes through two interconnected channels (the first one - schemes a and the second - schemes b) if the amount of the flow of wind energy is higher enough then is provided to the consumer and to the charge of the battery pack.

After analyzing the power supply of the consumer from these systems using the state of the queueing theory, it was established that it is necessary to apply two-channel schemes to increase the coefficient of filling load schedule of the consumer.

The mathematical model of the system "wind turbine - induction generator-consumer" was developed and analyzed. The analyze of the parameters that influencing the mode of operation of the WT system is carried out with the help of the Hurwitz criterion of stability, where the conditions, for which is necessary and enough that of all diagonal minors of the determinant that contains the coefficients of the characteristic equation, must be greater than zero, it means that must coincide the sign with the first coefficient of that equation.

Safety factor of stability will be characterized by the free member of the characteristic equation, which depends only on the dynamic properties of the block diagrams. It shows the need to predict the use of buffer elements. Since there is a shortage of reactive energy in an autonomous wind turbine with induction generator then is necessary to predict the possibility of its compensation that take place increasing the load or fluctuations in the wind speed. Thus, this model allows us to determine the factors and their combinations that affect the stability of the system. Their numerical value is expedient to conduct on the basis of simulation modeling of the modes operation of stand-alone wind turbine unit. In this research is developed a mathematical model of the system "wind turbine – induction generator-consumer", and after a rigorous analysis on the basis of the Hurwitz criterion was carried out, which allowed determining the nature that takes place in the dynamic processes, which affect its stability by the changes of wind speed.

In this thesis the develop of the simulation model for studying the operation modes of the stand-alone wind power system with induction generator, allowed observe and analyze the characteristics of the generator: rotor speed, electromagnetic torque, mechanical torque, voltage and current changes when changing the load and wind speed.

The simulation model of the autonomous wind turbine with induction generator was developed for determining its parameters of the operating mode, was established

that the consecutive connection of the load should be carried out with the certain interval of time until has finished the transient process caused by connecting the block of capacitors with adequate capacitance.

The analyzes of the stand-alone WT system when applying the inverters of alternating current into direct current for charging the battery system is carried out, since the most difficult task for the wind turbine operation is to regulate the voltage and frequency under the influence of changes in wind speed and maintenance of indicators in operating mode, and prevention of emergency situations. Through the simulation model developed analyzes the mode of operation of the wind turbine working with the pulse converter to charge the battery (load). Such a scheme improving the conditions of the wind turbine by reducing compensate the reactive power from an additional block of capacitors, not direct connecting to the consumer, it means that simplifies the scheme of the system for voltage and frequency control, and provided that the support of the rigidity of the generator characteristics is improved.

The patent obtained on utility model for charging storage batteries, which purpose is creating such a charger device, where connecting it to the output terminals of the voltage regulator of the serial circuit that include a transistor switch with a control system, a current sensor and a battery pack that increase the range of energy extraction from wind turbine with induction generator by increasing the range of its rotation controlling the consumed current, and as result increases the efficiency of the charge process of battery.

Thus, in comparison with the prototype, the proposed device allows controlling a load of the induction generator at different rotor speed and the value of the charging current of the battery, which corresponds to the state of the battery and the value of the input voltage. All the facts described above allow getting a new technical result - to increase the efficiency of the charging process of the battery and increase the amount of energy removal from the wind turbine at a wide range of rotational changes of the rotor of the generator.

The simulation model of the autonomous wind-electric installation with induction generator connected to the pulse converter for charging of storage batteries is

developed. It is established that during the adjust of the duty of the signal from 0,1 to 0,9, the maximum use of the wind energy, which is transformed by the induction generator into electrical energy. Thus, was achieved farther scientific approach to determining the operating modes of autonomous wind turbines with induction generator by changing: the rotation frequency of the rotor of the WT and load parameters, and by the use of a pulse converter for charging battery based on simulation modeling, which, unlike the known, allows obtaining system parameters in the conditions of its stability.

The conducted bench tests of the autonomous wind power plant with an induction generator have confirmed theoretical research work. A comparative analysis of experimental results and those obtained by simulation shows that the magnitude of the difference varies within 7%.

The conducted bench tests of the autonomous wind power plant with induction generator using the pulse converter for charging battery packs demonstrate that in a comparative analysis of experimental results and those obtained by modeling when changing the duty cycle from 0,2 to 0,9, the asynchronous machine does not lose the generator mode by changing the wind speed between 0,95-0,75% of the nominal value. Different values obtained from experiment and modeling reach 2 to 4%, it shows the adequacy of the model.

Results of the research has been used to develop a methodology and determine the wind energy potential of the Republic of Ecuador to apply the autonomous wind power plants; develop a methodology based on the simulation of autonomous wind turbine unit with induction generator to determine the modes of its operation at steady and variable wind speeds; develop of a methodology based on the simulation of autonomous wind turbine unit with induction generator to determine its operation modes by the use of the pulse converter for charging battery packs.

Results obtained in this research were used at the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine in the framework of carrying out scientific research work and in the educational process and scientific research of the Department of Power Supply prof. V.M. Sinkov Study & science Institute of Energy, Automation, and Energy-saving of NUBiP of Ukraine.

The studies presented in this work were conducted at the Department of Renewable Energy Sources “KPI Igor Sikorsky” on the priority directions of development of science and technology of Ukraine in the framework of research works "Improving the efficiency of the heating system of an administrative building through the use of local renewable energy sources" (state registration number of work 0115U002408) and "Complex systems of power supply of autonomous objects on the basis of use renewable energy sources "(state registration number 0117U004325).

Keywords: wind energetics, electric wind unit, the stability of stand-alone wind turbine system, induction generator, simulation model, pulse converter, charging batteries.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	16
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1 СТАН РОЗВИТКУ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ В ЕКВАДОРІ	23
1.1. Вітроенергетичні ресурси Еквадору	23
1.2. Розвиток вітроенергетики Еквадору	31
1.3. Споживання електроенергії в Еквадорі	34
1.4. Автономні вітроустановки в Еквадорі.....	39
1.5. Порівняльний аналіз генераторного обладнання, що входить до складу вітроелектричних установок	41
1.5.1. Аналіз способів регулювання частоти та напруги асинхронного генератора вітроелектроустановки	44
1.5.2. Аналіз режимів роботи асинхронних генераторів вітроелектро- установок.....	46
1.6. Мета і задачі дослідження.....	52
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ З АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ ДЛЯ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ ЕКВАДОРУ	54
2.1. Розробка методики та оцінка вітропотенціалу Еквадору	54
2.2. Обґрунтування конструкційної схеми автономної вітроелектроустановки з асинхронним генератором.....	64
2.2.1. Аналіз вибору схеми конструкції ВЕУ	65
2.3. Математична модель автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором.	71
2.4. Аналіз процесів стабілізації роботи автономної ВЕУ з асинхронним генератором.	74
2.5. Висновки за розділом.....	75
РОЗДІЛ 3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ З АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ.....	77

	15
3.1. Розробка загальної схеми імітаційної моделі.....	77
3.2. Розробка імітаційної моделі при змінній швидкості вітру	86
3.3. Дослідження режимів роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором при змінній швидкості вітру	87
3.4. Дослідження режимів стабілізації вихідних параметрів автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором.....	90
3.5. Розробка імітаційної моделі автономної вітроелектричної установки з використанням імпульсного перетворювача.....	93
3.6. Висновки за розділом.....	105
РОЗДІЛ 4 СТЕНДОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ З АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ	106
4.1. Розробка стенду для дослідження режимів роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором.....	106
4.2. Дослідження процесів стабілізації вихідних параметрів автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором.....	108
4.3. Дослідження впливу величини шпаруватості імпульсу перетворювача на вихідні показники асинхронного генератора вітроелектроустановки за різних значень швидкості вітру.....	109
4.4 Висновки за розділом.....	116
ВИСНОВКИ.....	117
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	119
ДОДАТКИ.....	131

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- λ – модуль швидкості;
 β – кут нахилу лопаті;
 ρ – щільність повітря;
 ω – кутова швидкість;
 φ_{ds} – проекції потокозчеплення статора на вісь d;
 φ_{qs} – проекції потокозчеплення статора на вісь q;
 φ_{dr} – проекції потокозчеплення ротора на вісь d;
 φ_{qr} – проекції потокозчеплення ротора на вісь q;
 ω_m – кутова частота обертання ротора;
 ω_r – електрична кутова частота обертання ротора;
 θ_m – кутове положення ротора;
 θ_r – електрична кутова частота обертання ротора;
 P – номінальна потужність;
 $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності;
 A – площа обмаху ротора;
 R – довжина лопаті;
 v – швидкість вітру;
 k – коефіцієнт посилення;
 R_s – активний опір розсіювання статора;
 R_r – активний опір розсіювання ротора;
 V_{qs} – проекції напруги статора на вісь q;
 V_{ds} – проекції напруги статора на вісь d;
 V_{qr} – проекції напруги ротора на вісь q;
 V_{dr} – проекції напруги ротора на вісь d;
 i_{qs} – проекції струму статора на вісь q;
 i_{ds} – проекції струму статора на вісь d;
 i_{qr} – проекції струму ротора на вісь q;
 i_{dr} – проекції струму ротора на вісь d;
 L_m – індуктивність ланцюга намагнічування;

L_s – повна індуктивність статора;

L_r – повна індуктивність ротора;

L_{ls} – індуктивність розсіювання статора;

L_{lr} – індуктивність розсіювання ротора;

H – сумарна інерційна постійна машини навантаження;

T_e – електромагнітний момент;

T_m – механічний момент на валу;

F – сумарний коефіцієнт в'язкого тертя (машини і навантаження).

ВСТУП

Розповсюдження використання відновлюваної енергії в світі, розвиток нових технологій та підвищення ефективності систем на їх базі, дозволяють оцінити ці види енергії як найперспективніші на сьогодні.

Зменшення викидів до атмосфери CO₂ – це мета, яку кожна країна поставила перед собою для реалізації у недалекому майбутньому. Енергія вітру одна з самих доступних та вже отримала застосування у народному господарстві, промисловстві. Різноманітні об'єкти, що приводять в дію за допомогою вітру перетворюють кінетичну енергію в електричну. Споживчий ринок пропонує використовувати вітроустановки (ВЕУ) від малих (кілька Вт) до великих потужностей (МВт). Для ВЕУ малої потужності є ринок, що забезпечує використання цих систем у сільських районах віддалених від центральної мережі або у важкодоступних місцях.

Вироблення електроенергії за допомогою ВЕУ малої потужності, останніми роками знову відновило свої позиції на ринку після спаду у 2013 році. Звіт 2016 року [1] наводить показник зростання потужності ВЕУ, встановлених на кінці 2014 р., на 8.3% порівняно з 2012 р. В 2014 році потужність встановлених ВЕУ малої потужності у світі склала 945 тис.кВт [1].

У 2014 році встановлена потужність ВЕУ в світі досягла 830 МВт. Тобто, зростання склало 10.9 % у порівнянні з 2013 роком [1]. В перспективі, до 2020 р., очікують, що зростання ринку ВЕУ малої потужності буде стабільним, як це показав 2015 рік. Збільшення встановленої потужності на 11 % передбачається в 2016 році. Останні дані показують, що до 2020 р. буде зростання близько 20%, що дасть можливість досягти до 1,75 ГВт [1].

Еквадор в останні роки встановив нові вітроенергетичні станції. Вітроенергетика стала стратегічним сектором для диверсифікації видів енергії. На сьогодні встановлені вітропарки мають потужність більше, ніж 800 кВт. У випадку автономних ВЕУ малої потужності - це ринок, що мало розвивається. На його розвиток впливають різні факти, а саме: недостатня інформація про вітровий потенціал та обмеженість місць, де можна встановити системи з ВЕУ.

Зі збільшенням населення виникає необхідність забезпечення електроенергією людей, що живуть у віддалених місцевостях, сільських районах та населених пунктах, де існує великий дефіцит електроенергії. Автономні ВЕУ з асинхронним генератором, з точки зору експлуатації та економічної доцільності, є простими в експлуатації та найбільш підходять для вирішення даної задачі. Проте потрібно розробити такі схеми ВЕУ, щоб забезпечити автономний режим їхньої роботи. Такі системи мають забезпечити безперервну подачу електроенергії до споживача. Для виконання такої роботи необхідно аналізувати різні режими роботи, залежно від природних умов і цільового призначення.

В Еквадорі на сьогоднішній час розроблено план розвитку електричного сектору, де основну роль грає відновлювана енергетика. Вона буде зменшувати залежність від традиційних видів палива для теплових електростанцій та зменшувати викиди CO₂ в атмосферу.

Одним з видів відновлюваної енергетики є енергія вітру, яка в Еквадорі тільки починає освоюватись. Перший вітропарк було встановлено 2013 р. в континентальній частині. У майбутньому є намір встановити інші ВЕУ, що потребують значних інвестицій.

Актуальність теми. Вирішення задачі генерування електроенергії для споживачів у віддалених районах та ізольованих місцевостях республіки Еквадор, можливе за рахунок розробки автономних систем на базі вітроелектроустановок з асинхронним генератором (АГ), використання яких з точки зору простоти експлуатації та економічної сторони є доцільним конструктивним рішенням. Вітер є однією з альтернатив для диверсифікації генерування електроенергії для енергозабезпечення даних споживачів.

Величина швидкості вітру в умовах Еквадору коливається в межах від 4 до 6 м/с, що характеризуються як середня. Постає питання аналізу режимів роботи вітроелектричної системи за умови її стійкості за даних метеорологічних параметрів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження, що подані в роботі, проводилися на кафедрі відновлюваних

джерел енергії НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» за пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки України в рамках науково-дослідних робіт «Підвищення ефективності системи теплозабезпечення адміністративної будівлі за рахунок використання місцевих відновлюваних джерел енергії» (державний реєстраційний номер роботи 0115U002408) та «Комплексні системи енергозабезпечення автономних об'єктів на базі використання відновлюваних джерел енергії» (державний реєстраційний номер роботи 0117U004325). У виконанні роботи здобувач брав безпосередню участь.

Мета і задачі дослідження Мета дисертаційних досліджень полягає у визначенні раціональних режимів роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором за метеорологічних умов Еквадору.

Для досягнення мети вирішувалися наступні задачі:

- проведена оцінка вітроенергетичного потенціалу та енергоспоживання у всіх районах Еквадору;
- обґрунтовані структурні схеми автономних ВЕУ з асинхронним генератором;
- виконані розробка та аналіз математичної моделі вітроелектричної автономної установки з асинхронним генератором за умови її стійкості;
- розроблена імітаційна модель автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором для визначення її параметрів режиму роботи;
- розроблена імітаційна модель автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором з підключенням імпульсного перетворювача для визначення її параметрів режиму роботи;
- проведені стендові дослідження режимів роботи автономної вітроелектричної установки.

Об'єкт дослідження – електроенергетичні процеси в системі «вітроагрегат – асинхронний генератор – споживач».

Предмет дослідження – параметри режимів роботи автономної вітроелектроустановки з асинхронним генератором.

Методи дослідження. Для розв'язку поставлених задач використовувались

методи теорії масового обслуговування, методи математичного, імітаційного та фізичного моделювання при аналізі та синтезі автономних вітроелектричних установок.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

– вперше проведена науково обґрунтована оцінка вітроенергетичного потенціалу республіки Еквадор, що дало можливість визначити ті гірські райони країни, в яких найбільш перспективне розташування вітроелектричних автономних установок;

– набув подальшого розвитку науковий підхід визначення режимів роботи автономних вітроелектроустановок з асинхронним генератором при змінних частоті обертання ротора вітроустановки та параметрах навантаження на базі імітаційного моделювання, що, на відміну від відомих, дозволяє отримати параметри системи за умов її стійкості;

– отримав подальший розвиток науковий підхід визначення режимів роботи автономних вітроелектроустановок з асинхронним генератором за зміни частоти обертання ротора вітроустановки на базі імітаційного моделювання при використанні імпульсного перетворювача для зарядження акумуляторних батарей, що на відміну від відомих, дозволяє отримати параметри системи за умов її стійкості.

Практичне значення отриманих результатів:

– розроблено методику та визначений вітроенергетичний потенціал республіки Еквадор з умов використання автономних вітроелектричних установок;

– розроблено методику на базі імітаційного моделювання вітроелектричних автономних установок з асинхронним генератором для визначення режимів її роботи при сталих та змінних швидкостях вітру;

– розроблено методику на базі імітаційного моделювання вітроелектричних автономних установок з асинхронним генератором для визначення режимів її роботи при використанні імпульсного перетворювача для зарядження акумуляторних батарей.

– результати досліджень використані в Інституті відновлюваної енергетики НАН України в рамках виконання науково-дослідної роботи та в навчальному процесі і наукових дослідженнях кафедри електропостачання ім. проф. В.М.Синькова ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення і результати, викладені в дисертації, розроблені автором особисто. Формулювання мети роботи, вибір методологічних підходів, узагальнення результатів виконані безпосередньо дисертантом за участю наукового керівника. Роботи [1, 8] написані автором самостійно. В друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: в [2 - 4] – проектна модель та реалізація імітаційного моделювання, в [5] – аналіз експериментальних результатів, в [6, 7] – аналіз стійкості до малих збурень, в [9] – аналіз імітаційної моделі, в [10] – аналіз базового аналогу.

Матеріали дисертаційної роботи не містять без належного посилання ідеї і розробки, які б належали співавторам, з якими були опубліковані наукові роботи.

Апробація результатів роботи. Основні теоретичні положення, результати та висновки дисертаційної роботи доповідалася і обговорювалися на наступних міжнародних конференціях: III Міжнародна науково-технічна конференція, «Оптимальне керування електроустановками» – м. Вінниця, 2015 р.; XVI, XVII Міжнародна наукова-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття» – м. Київ, 2015, 2016 р.р.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано у 10 наукових працях, у тому числі: 4 статтях у наукових фахових виданнях України та 1 у науковому міжнародному виданні, 1 статті у науковому виданні України, 3 тезах доповідей на науково-технічних конференціях, 1 патенті на корисну модель.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел. Робота має обсяг 134 сторінок, з них 100 сторінок основного тексту, що містить 63 рисунка, 11 таблиць, 109 найменувань використаних джерел та 5 додатків.

РОЗДІЛ 1

СТАН РОЗВИТКУ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ В ЕКВАДОРІ

1.1. Вітроенергетичні ресурси Еквадору

В останні роки відновлювана енергетика (ВЕ) Еквадору розвивається прискореними темпами. Еквадор спрямував свій інтерес в енергетичний сектор на використання всіх видів ВЕ, оскільки країна є залежною від імпорتنних видів палива, що використовується на теплових електростанціях (ТЕС) і які виробляють недостатню кількість електроенергії для країни. Еквадор вимушений імпортувати електроенергію від сусідніх країн - з Колумбії та Перу. Еквадор в останні роки активно розвиває свій енергетичний сектор, побудував нові електростанції, проводить оцінку потенціалу ВЕ, реконструює всі електромережі. Відносно до стимулів для розвитку ВЕ, державний орган – Міністерство енергетики та відновлюваних джерел енергії (МЕЕР) – прийняв угоду № 035, у січні 2009 року: Сприяння сталому розвитку енергетичних ресурсів та підтримці проектів з ВЕ та побудову нових електростанцій з високою енергоефективністю [2].

Сучасний розвиток освоєння ВЕ, у тому числі вітроенергетики Еквадору проходить завдяки інвестиціям приватного сектору та державних органів, що керують енергетичним сектором, незважаючи на сучасну економічну кризу. На сьогодні на архіпелазі Галапагос працює перший проект ВЕС, який був реалізований на острові Сан-Крістобаль [2,3]. Кількість електроенергії, що виробляє ВЕС, становить 50% від потреби електроенергії острова. ВЕС має 3 турбіни потужністю 800 кВт кожна і генерує в середньому 5300 МВт·год. на рік [4]. Зберегання екосистеми архіпелагу Галапагос – це одна з важливих цілей держави, тому планують встановити нові станції з використанням ВЕ для того, щоб в майбутньому зменшити споживання від дизельного генератора. Проведено розширення ВЕС на острові Валтра, що має встановлену потужність 2.5 МВт, і вже виробила близько 3,023 МВт·год. в 2015 р. [5,6].

Континентальну частину Еквадору, можна поділити на три райони: гірський, узбережжя, Амазонка. Кожний з них за оцінкою вітрового потенціалу має сприятливі умови для встановлення ВЕС крім району Амазонка, де його більша частина покрита лісами, які уповільнюють вітрові потоки, що складають вітровий потенціал [7]. Перша ВЕС, так звана Віллонако була встановлена в гірському районі провінції Лоха. Вітрові умови в цій зоні є сприятливими і ВЕС перевищила техніко-економічну оцінку – коефіцієнт використання встановленої потужності перевищив 50 % в той час, як інші ВЕС країни мають коефіцієнт використання в межах 30-40 %. Дана ВЕС має встановлену потужність 16,5 МВт та виробляє електроенергії на рік близько 59 ГВт·год.

Проте вітровий потенціал Еквадору не високий через своє географічне положення, тому реалізація більшості проектів ВЕС орієнтується на гірський район. У стадії попередньої техніко-економічної оцінки знаходиться проект на будівництво станції потужністю близько 100 МВт [8]. В даний час в Еквадорі встановлено вітроустановки потужністю приблизно 21 МВт, дані про які наведені в табл. 1.1 та 1.2.

Таблиця 1.1

Встановлена потужність ВЕС на Галапагоських островах.

Місце розташування	Встановлена потужність, МВт	Кількість ВЕУ, шт.	Одинична потужність ВЕУ, МВт	Вироблена енергія, МВт·год/рік
о. Сан Крістовал	2.4	3	0,8	5300
о. Валтра	2.5	3	-	-

Таблиця 1.2

Встановлена потужність в континентальній частині Еквадору

Місце розташування	Встановлена потужність, МВт	Кількість ВЕУ, шт.	Потужність ВЕУ, МВт	Вироблення енергія, МВт·год/рік
Віллонако	16.5	11	1 - 1.8 МВт	59570.0

Розташування електростанцій встановленою потужністю більше 10 мВт наведена на рис.1.1.

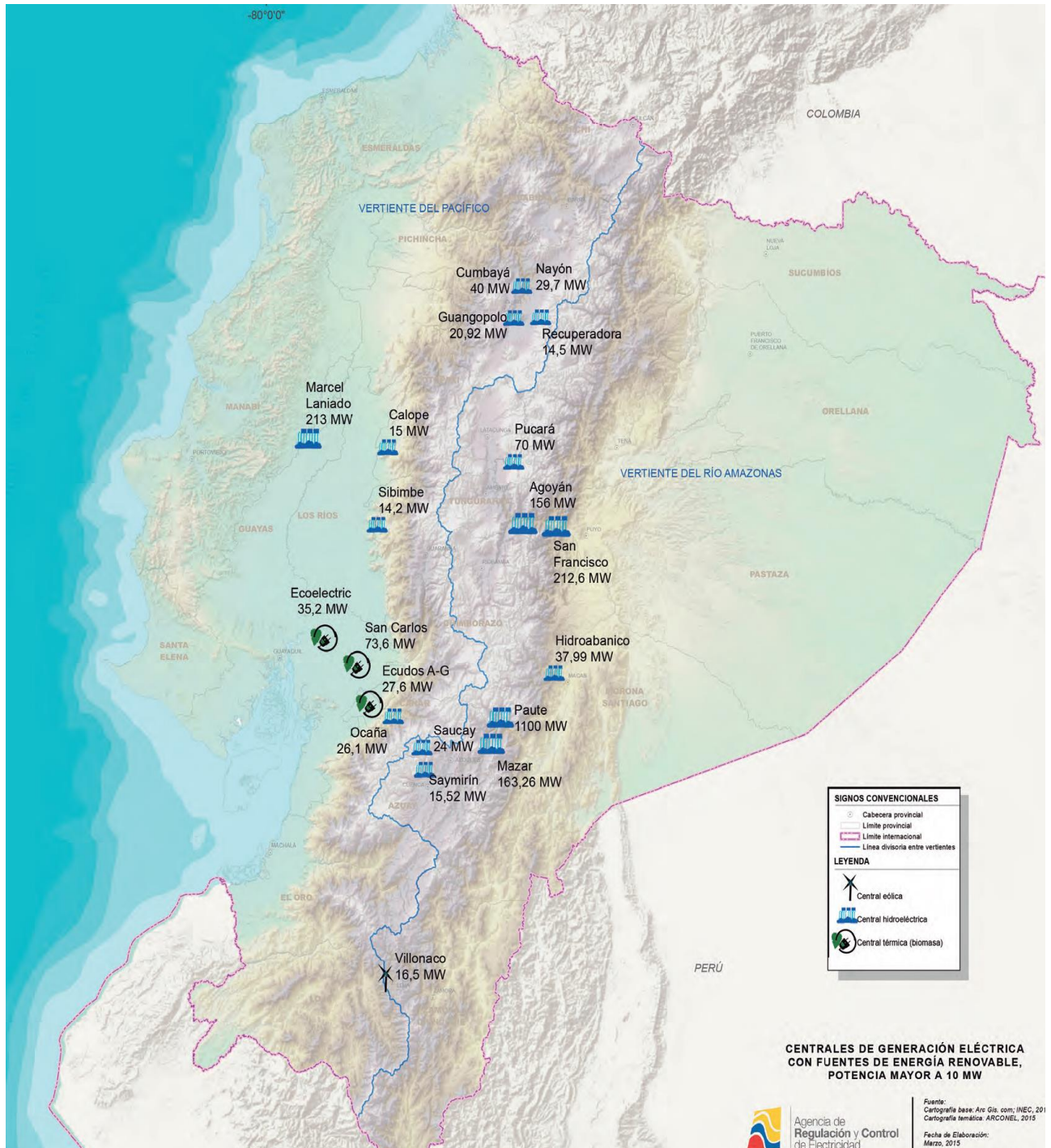


Рис. 1.1. Електростанції потужністю більше 10 МВт.

Загальна потужність електростанцій потужністю більше 10 МВт складає 2662,28 МВт, а потужністю менше 10 мВт – 354,48 МВт.

Місце знаходження електростанцій, які мають потужність менше 10 мВт наведено на рис.1.2.

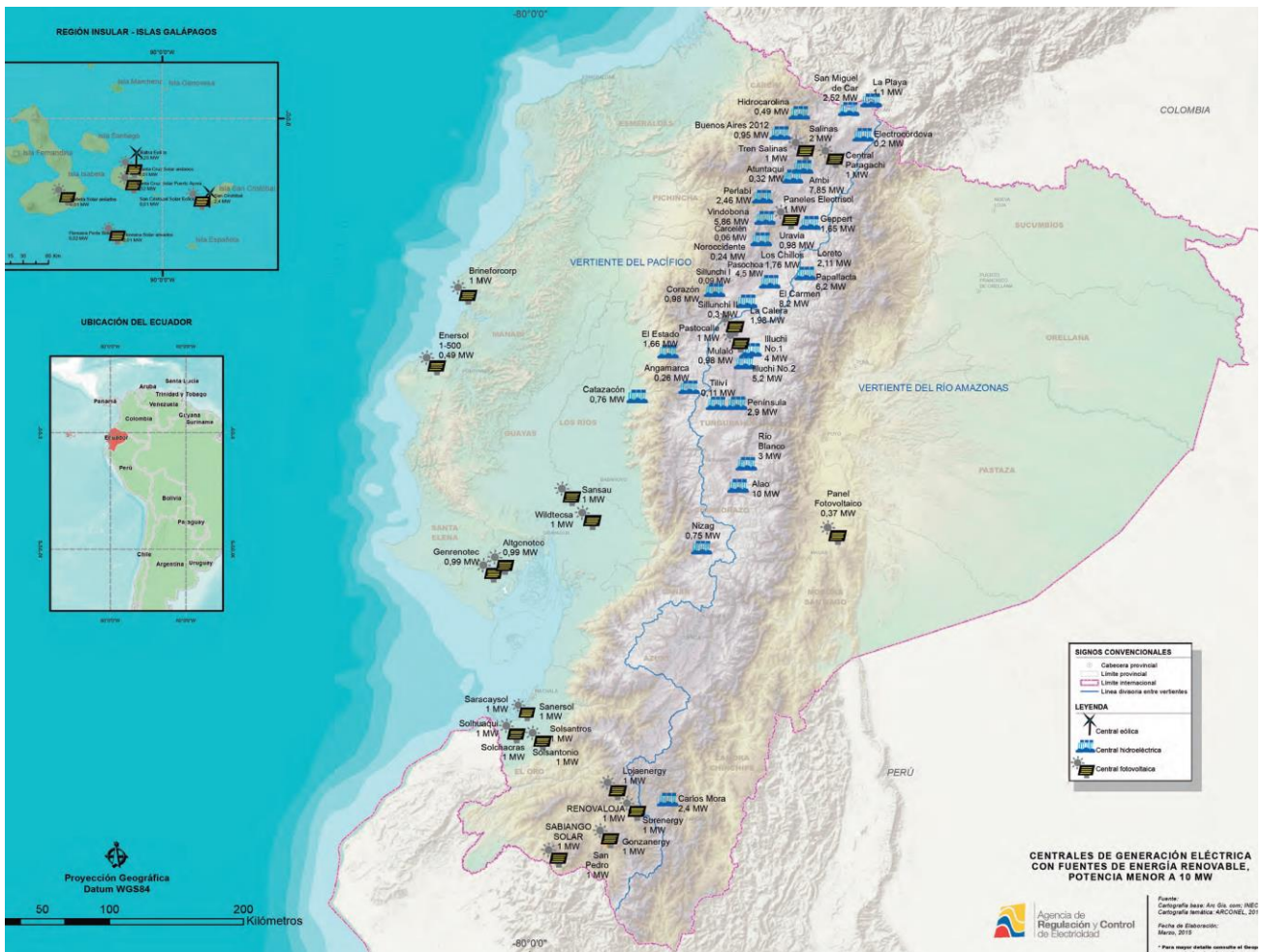


Рис. 1.2. Електростанції потужністю менше 10 мВт.

Перша оцінка вітрового потенціалу Еквадору була проведена Інститутом електрифікації (INECEL), який відповідав за дослідження енергетичних ресурсів країни. Інститутом проводилися вимірювання швидкості вітру у місцях з найбільш придатними умовами для встановлення ВЕУ. Як державний орган, Національний інститут метеорології та гідрології (INHAMI) має бази даних від своїх метеостанцій [11], що розподілені за всією материковою та острівною частинами, але більшість з них не знаходиться в місцевості, де існують придатні умови для ВЕС, оскільки ці спостереження метеостанцій використовуються для аграрного сектору. Оскільки існувало мало даних про ресурси вітру Еквадору, центр для енергетичного дослідження (СІЕ) здійснив ряд досліджень в галузі вітроенергетики: вимірювання швидкості вітру на узбережжі в провінції Манаві [12], в гірському районі в місті Гуаскачака (Huascachaca) (проект належить Electroaustro).

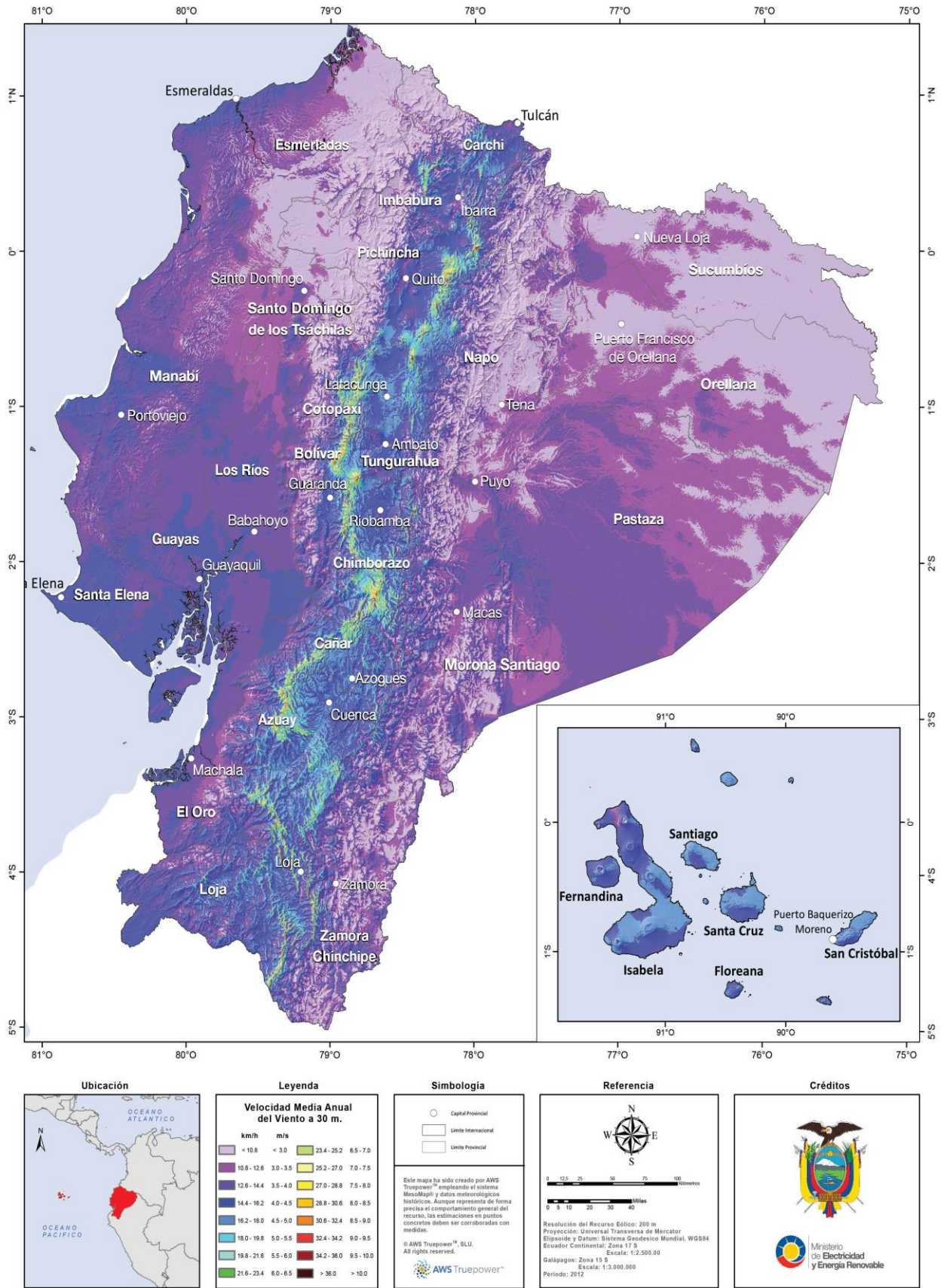


Рис. 1.3. Атлас вітрового потенціалу Еквадору.

За допомогою кадастру можна аналізувати місця придатні для встановлення ВЕУ, при висоті вимірювання швидкості вітру на висоті 30 м над рівнем землі.

Загальна оцінка вітрового потенціалу континентальної та острівної частини Еквадору наведена у вітровому атласі [10]. Місця з високим потенціалом для встановлення ВЕУ показані на рис. 1.3. Дана оцінка вітрового ресурсу отримана за умов висоти місцевості нижче 3500 м над рівнем моря та швидкості вітру більше 7 м/с. Результати показують, що вітровий потенціал складає 2868.98 ГВт·год/рік при виробленні електроенергії. При цьому враховувались умови за місцем розташування від електромережі або доріг – ≤ 10 км, що дає можливість використанням вітрового потенціалу для короткострокових термінів з річним виробленням електроенергії 1518.17 ГВт·год/рік, (табл. 1.3).

Таблиця 1.3

Вітровий потенціал Еквадору

при тривалій експлуатації			
Швидкість вітру, м/с	Площа, км ²	Потужність, МВт	Передбачений виріток енергії, ГВт·год/рік
>7	556,9	1670,96	2868,98
>7.5	309,96	929,87	1995,68
>8	166,54	499,61	1286,72
>8.5	91,59	274,76	825,57
при короткостроковій експлуатації			
>7	294,74	884,22	1518,17
>7.5	158,50	475,51	1020,54
>8	82,64	247,91	638,47
>8.5	45,35	136,06	408,81

Попередні дані показують, що гірський район має найбільший вітровий потенціал для встановлення ВЕУ. Різниця висот в гірському районі та сильна сонячна інсоляція є умовами для створення режимів місцевого вітру [13]. На характер цих вітрів впливають схили Анд, створюючи ефект Вентурі. Ці сильні вітри, однак, виробляються в дуже високих місцях, де крім складності доступу до місця розташування, проходить зменшення енергії вітру пропорційно

зменшенню густини повітря за висотою [10].

Оцінка вітроенергетичного ресурсу в провінції Лоха-Віллонако на висоті 2800 м над рівнем моря, показала, що вона є найперспективнішою зоною, оскільки річна середня швидкість вітру > 8 м/с.

В провінції Імбабура знаходяться інші перевірені місця для встановлення ВЕС, де середня швидкість вітру 7 м/с. Ці дані отримані з різних метеостанцій за декілька років. Компанія ElectroViento.SA отримала ліцензію для здійснення проекту ВЕС, але за декілька років була позбавлена даної ліцензії через те, що не надала гарантій повернення інвестицій. Проектом займається муніципальний орган, аналіз якого більш детально описаний в [8], і де наведена схема розташування ВЕУ.

За допомогою Національного Інституту Інвестицій (IPN) та (MEER), який підтримує проект дослідження вітрового потенціалу в провінції Карчі місцевості Гарсія Морено. Останні результати показують, що річна середня швидкість вітру складає 7.4 м/с. Проте сусідні місцевості (Сан Іздро), де проводили спостереження, показують, що річна середня швидкість вітру < 4 м/с [14,8].

На узбережжі взаємодіють вітри пасатів зі сходу з двома місцевими циркуляціями: бриз, що формується за різниці між температурою материка та океану, і гірськодолинні вітри Анд [10].

В районах Амазонки, більшу частину території покривають ліси, тому можна говорити про їх вирішальний вплив на зниження швидкості вітру пасатів, які рухаються над землею [10].

На Галапагоському архіпелазі можна виділити три важливі моменти, щоб зрозуміти характер вітру: це є острови вулканічного походження і підлягають впливу пасатів. Над островами глобальні вітри менше зазнають перешкод, ніж на континенті. Однак, пасати в цих низьких широтах мають меншу інтенсивність. Характеристикою вулканічних островів є те, що на них існують значні нахили з сформованими лабіринтами, в яких вітер сходиться і розходиться (тобто проходить прискорення і гальмування) у відносно невеликому просторі з одночасно зміною напрямку [10].

За умови збереження чутливої екосистеми архіпелагу визначені потенційні місця на острові Сан-Крістобаль та Валтра. За результатами досліджень з вимірювання середньої швидкості вітру в Сан-Крістобаль встановлено, що вона складає 6.8 м/с, а на Валтра - 5.8 м/с на висоті 40 м [3,4].

На рис. 1.4. наведені всі місця, де визначений вітровий потенціал: Лоха – Мемврілло, Дукал, Лас Чінчас; Азуай – Уаскачака; Імбабура – Салінас; Карчі – Сан Гавріел.

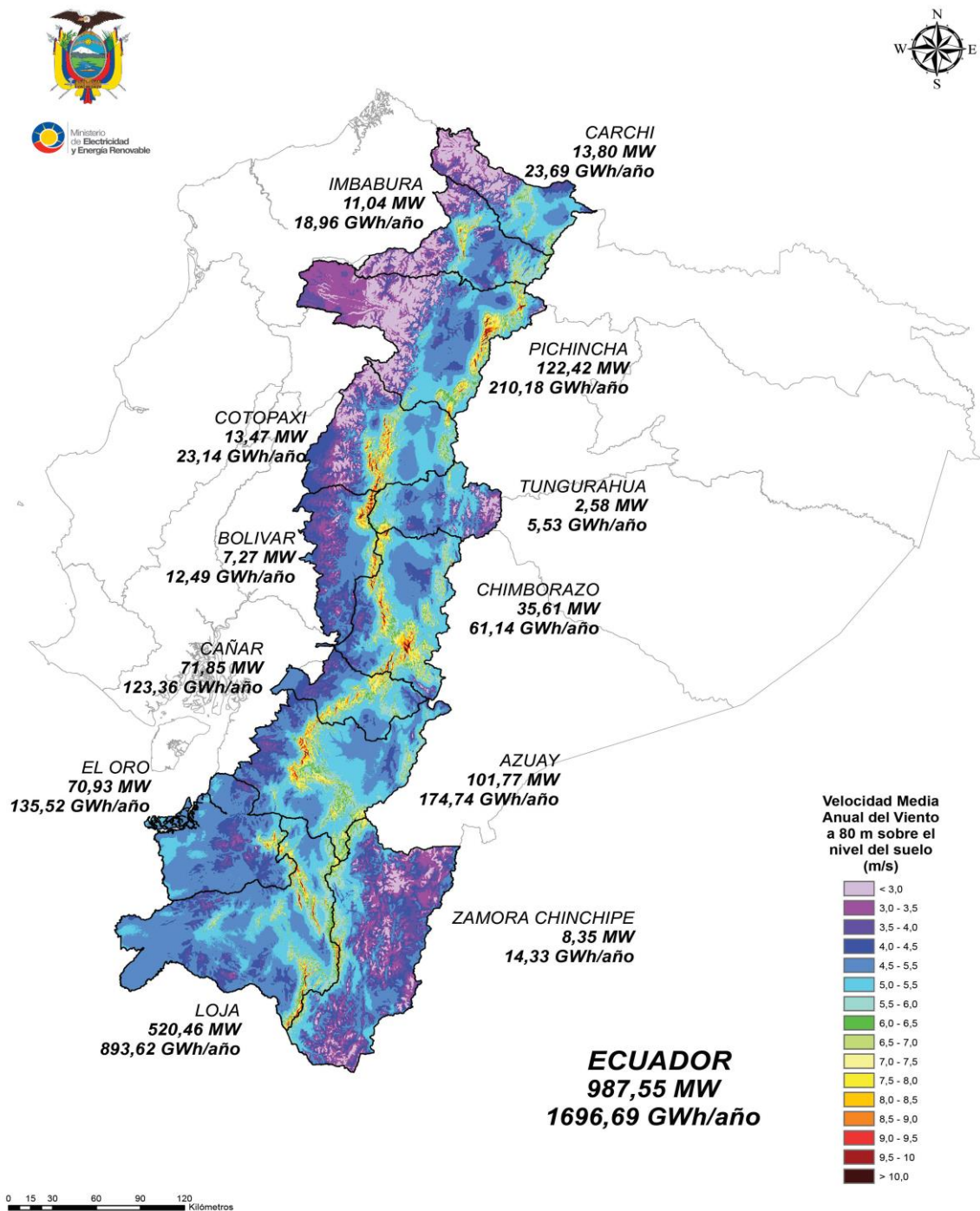


Рис. 1.4. Потенціал енергії вітру в гірському районі.

Для розвитку вітроенергетики в Еквадорі потрібно розширювати дослідження з вимірювання та оцінки вітрового потенціалу за всією територією. Для розвитку цього питання використовувалися методики та джерела інформації НАСА, які протягом 20 років збирали інформацію про дані клімату, оцінювали вітрові ресурси в областях провінції Ел Оро, Лоха і Самора Чінчіпе [15].

Місця з великим вітровим потенціалом знаходяться в гірських районах. Не дивлячись на відносно велику висоту над рівнем моря в цих районах не бувають екстремальні низькі температури. Хоча у гірських районах спостерігається менша густина повітря та швидкість вітру, але їх значення достатні для встановлення ВЕУ з коефіцієнтом використання встановленої потужності вище 40 %.

1.2. Розвиток вітроенергетики Еквадору

На сьогоднішній день енергетична галузь грає важливу роль у розвитку Еквадору. Міністерство енергетики та відновлюваних джерел енергії (MEER) - головний орган в енергетичному секторі, що відповідає за планування, контроль та розвиток галузі. Державний стратегічний план спрямований на підвищення енергоефективності, відновлення всієї енергосистеми та розвиток і використання нетрадиційних енергетичних ресурсів. Еквадор планує здійснити використання всього потенціалу відновлюваних ресурсів, що передбачає отримати 90 % загальних потреб країни. У 2016 році програма інвестицій у сфері альтернативної енергетики завершується з запуском всіх проектів, що включає 8 гідроелектростанцій – це зменшить забруднення навколишнього середовища.

Не зважаючи на те, що країна має великий гідравлічний потенціал, вона спрямувала свою програму для використання всіх видів ВДЕ, в тому числі та енергію вітру. В Еквадорі згідно зі світовими тенденціями розвитку вітроенергетики за допомогою різних інвестиційних фондів було завершено будівництво першої вітроелектростанції (ВЕС) в 2007 році із встановленою потужністю 2.4 МВт. У 2012 році завершено будівництво ВЕС у Віллонако, встановленою потужністю 19 МВт. У 2014 році на Галапагоських островах завершено другий проект ВЕС встановленою потужністю 6 МВт.

Слід враховувати, що країна немає великого вітрового потенціалу у порівнянні з іншими країнами світу, але існують перспективні потенційні зони для встановлення нових ВЕС. Досвід показує, що найкращим місцем є гірські, морські та прибережні райони. Найбільший вітровий потенціал Еквадору концентрується в гірських районах.

В Еквадорі існували декілька проектів, які не були завершені та зупинилися на стадії вимірювання. Ці проекти проводили колишній державний інститут INCECEL. Вже в 2009 р. нове міністерство (MEER), зацікавлене в розвитку вітроенергетики, випустило перший атлас вітру Еквадору, який є доступним для аналізу вітрового потенціалу країни.

Враховуючи чутливість екологічного середовища Галапагоського архіпелагу, MEER все таки поставило за мету задовольнити всі потреби в електроенергії островів від ВДЕ, в тому числі в першу чергу за рахунок розвитку вітроенергетики. В Сан-Крістобаль Галапагоського архіпелагу компанія LHAUEMER провела техніко-економічне обґрунтування проекту ВЕС. У 2014 р. на архіпелазі Галапагос почала працювати друга ВЕС – проект Валтра – Санта Крус.

На сьогоднішній день ВЕС в Еквадорі побудовані на базі вітроагрегатів, вироблених за кордоном фірмою Gamesa, Goldwind. Власною виробництва вітроагрегатів в країні немає.

Основну підтримку розвитку вітроенергетики в Еквадорі проводить державний сектор, в плані отримання достовірних даних про вітровий потенціал та можливості встановлення ВЕУ на континентальній частині. MEER інвестував в першу ВЕС близько 43 мільйонів доларів. Слід відмітити, що для початку розвитку освоєння ВДЕ, державні органи прийняли нові закони відносно до використання інвестиційних фондів, зелених тарифів, знімання податків для імпортерів [16]. В Еквадорі створена Національна комісія регулювання електроенергетики (CONELEC) як орган для регулювання енергетичного сектору, в тому числі для встановлення зелених тарифів для ВДЕ. Зелений тариф для вітроенергетики встановлює 0.913 цент за 1кВт·год [17,18].

Перспективним для розвитку вітроенергетики в країні є інвестиції приватного сектору, в тому числі в проект розширення ВЕС Віллонако, так званий Дукал-Мемврілло, який може досягнути приблизно 250 мільйонів доларів інвестицій для встановлення ВЕУ потужністю 50 МВт [19]. Динаміка розвитку вітроенергетики є позитивною, завдяки продовженню розвитку нових проектів, що знаходяться на різних етапах, табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Стан проектів ВЕС в Еквадорі

Розташування проектів	Стан проекту	Потужність, МВт	Середня швидкість вітру, м/с
Віллонако	Завершено	16.5	12.7
Уайрапамва	Вимірювання, попереднє техніко-економічне вивчення	15.0	10.8
Дукал-Мемврільо	Вивчення	42.0 - 48.0	11
Уакакоча	Вивчення	15.0	8.5
Качіпамва	Вимірювання, попереднє техніко-економічне вивчення	10	12.5
Салінас 1	Вивчення		
Салінас 2	Вимірювання	16.5	5.5
Уаскачака	Вивчення	10.0	5.5

На сьогоднішній день на всій континентальній частині проектується нові станції з використанням ВДЕ, розташування яких наведено на рис. 1.5.

Враховуючи важливість подальшого вивчення та дослідження ВДЕ, в Інституті відновлюваних джерел енергії та енергоефективності (INER) в напрямку розвитку вітроенергетики досліджується робота ВЕС Віллонако, що розташована на висоті 2800 м над рівнем моря. Мета досліджень – визначення змін метеорологічних чинників, що впливають на енергетичну продуктивність ВЕС [20].

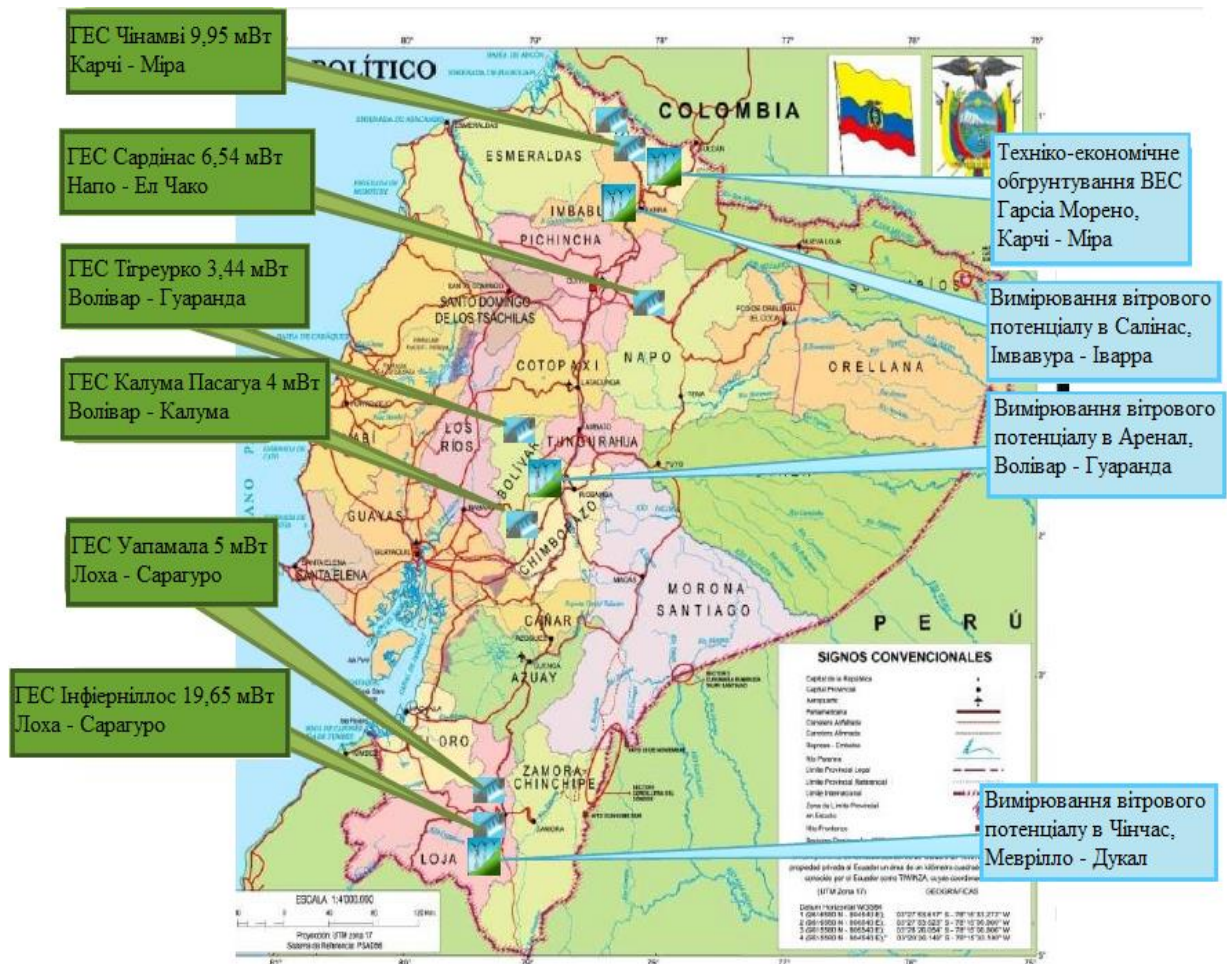


Рис. 1.5. Проекти ВДЕ на континентальній частині Еквадору.

Нині в Еквадорі розглядаються питання про використання «чистої енергії», тому можна сподіватися на нові інвестиції, що будуть грати важливу роль в стимулюванні розвитку відновлюваних джерел енергетики.

1.3. Споживання електроенергії в Еквадорі

Генерування електроенергії в Еквадорі відбувається на базі відновлюваних та традиційних джерел енергії. До 2014 року генерування електроенергії від традиційних джерел енергії становило 49,1 % від загального виробництва. У 2015 році сумарна встановлена потужність склала 6 ГВт. У 2018 році планується додаткове введення 2,849 ГВт за рахунок будівництва 8 гідроелектростанцій. Тоді генерування електроенергії буде становити більше 90% від обсягу відновлюваних джерел енергії. На рис. 1.6. наведені діаграми генерування електроенергії від різних джерел [21]. З них генерована електроенергія вітроелектростанцій (ВЕС) становить 75 ГВт·год.

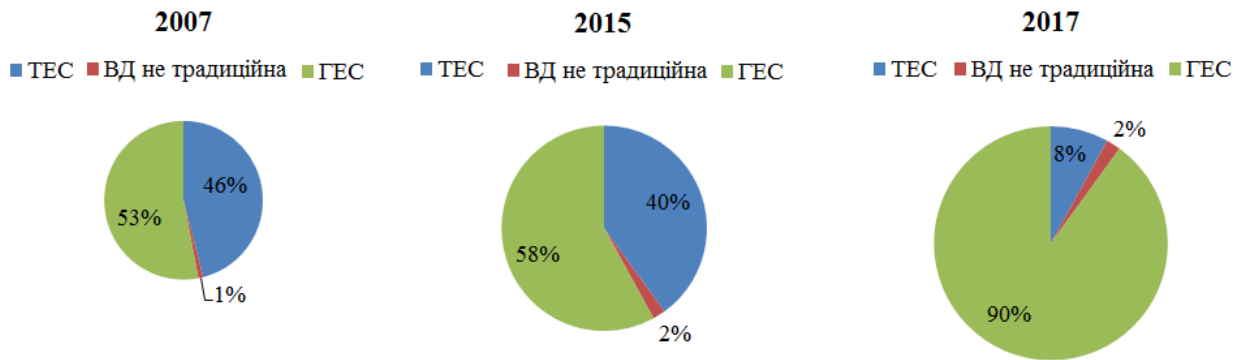


Рис. 1.6. Генерування електроенергії від різних джерел енергії.

Пріоритетним напрямком є максимальне використання гідропотенціалу. Крім цього державні органи планують використовувати енергію сонячної радіації та вітру.

Автономні системи, що виробляють електроенергію з використанням різних джерел, мають встановлену потужність 678,82 МВт [22]. Дані системи використовують по всій території Еквадору для забезпечення електроенергією віддалених та важкодоступних районів. В табл. 1.5 наведено існуючі автономні системи, що використовують різні джерела енергії. Більшість автономних систем використовують двигуни внутрішнього згорання.

Державний орган CONELEC проводив програму «Електрифікація сільських районів з використанням ВДЕ». За результатами отриманими у ході програми в період 2008-2012 рр. в сільській місцевості Еквадору існує 43923 домогосподарств, які знаходяться досить віддалено від загальної електромережі національного оператора (SNI). Крім того, ці домогосподарства віддалені один від одного. В Амазонії таких 84,7 %, на узбережжі - 7,4 %, у гірських районах 7,9 % від загальної кількості [23].

Таблиця 1.5

Автономні системи, що використовують різні джерела енергії

Місце розташування	№ Електростанції	Вид електростанції	Встановлена потужність, МВт
1	2	3	4
Напо	1	ДЕС	7,78
Пастаза	2		40,43

1	2	3	4
Ореллана	26	ДЕС	41,15
Сукумбіос	22	ДЕС	86,57
Гуаяс	2	ДЕС	2,88
Ореллана	1	ДЕС	18,6
Сукумбіос	1	ДЕС	8,8
Морона Сантіаго	1	ПТУ	0,24
	1	СЕС	0,37
Котопаксі	3	ГЕС	2,68
Галапагос	11	ВЕС	16,64
Чімворазо	1	ГЕС	0,75
Пічінча	1	ГЕС	0,06
Галапагос	1	ВЕС	2,40
Есмералдас	1	ДЕС	1,72
Напо	2	ДЕС	7,89
Пічінча	2	ДЕС	0,32
Сукумбіос	2	ДЕС	9,5
Напо	2	ДЕС	23,8
Ореллана	22	ДЕС	133,55
	1	ПТУ	11,0
	1	ГТУ	3,35
Пастаза	1	ДЕС	7,36
Сукумбіос	28	ДЕС	98,71
	2	ГТУ	14,95
Ореллана	2	ГТУ	54,00
	3	ДЕС	65,77
Сукумбіос	1	ДЕС	1,60
	1	ГТУ	5,60
Ореллана	6	ДЕС	10,43
Усього	151		678,82

Завдяки реалізації національної програми розвитку в 2009-2013 рр. була проведена електрифікація країни, яка охопила 98 % міських та більше ніж 93 % сільських домогосподарств. Проте, гострий дефіцит електроенергії спостерігається в районних провінцій Амазонки [4]. Останні дані електрифікації країни 2014 року наведені табл. 1.6 [24].

Таблиця 1.6

Електрифікація Еквадору 2014 року

Район	Покриття електроенергією Еквадору (2014), %
Гірський	98,48
Амазонка	93,70
Узбережжя	96,07
Острівний	99,67

Стан електрифікації країни згідно із державним планом електрифікації сільських та приміських районів FERUM до 2022 року, що враховує обсяг інвестицій та зростання кількості населення у цих районах [25], наведений на рис.1.7 та 1.8.

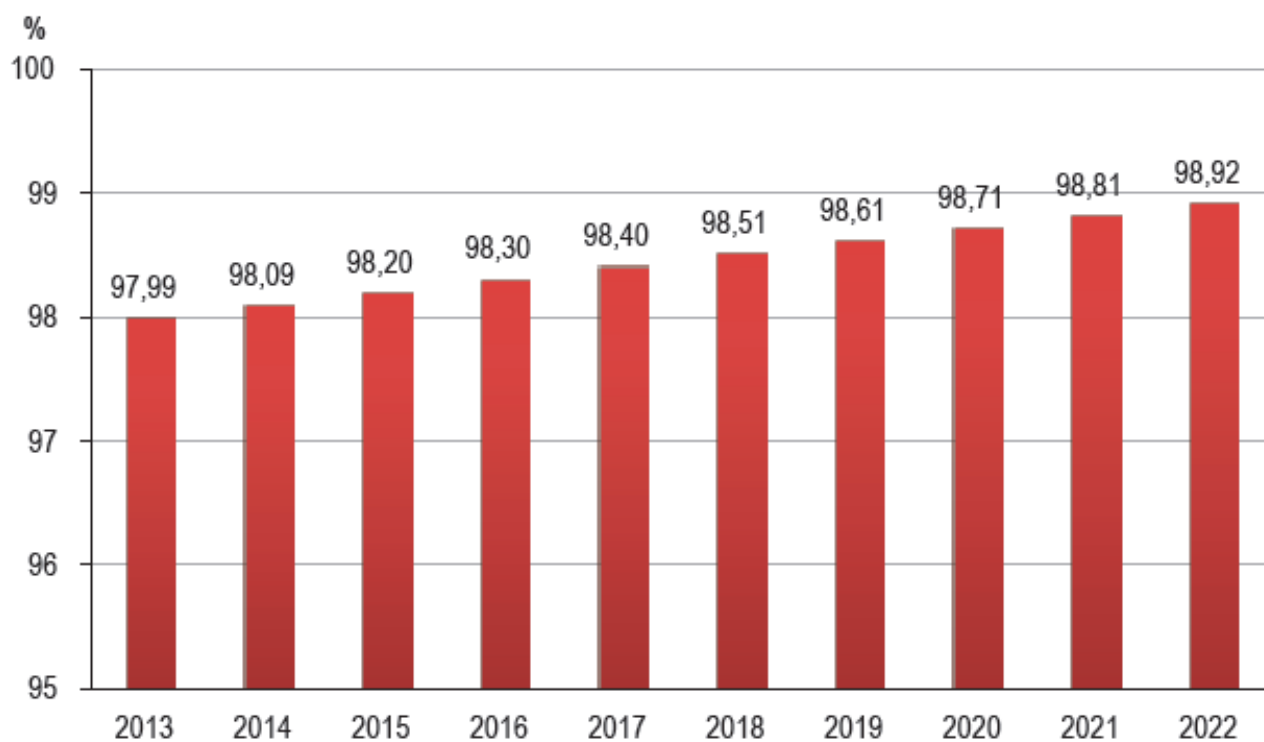


Рис. 1.7. Електрифікація приміських районів 2013-2022 рр.

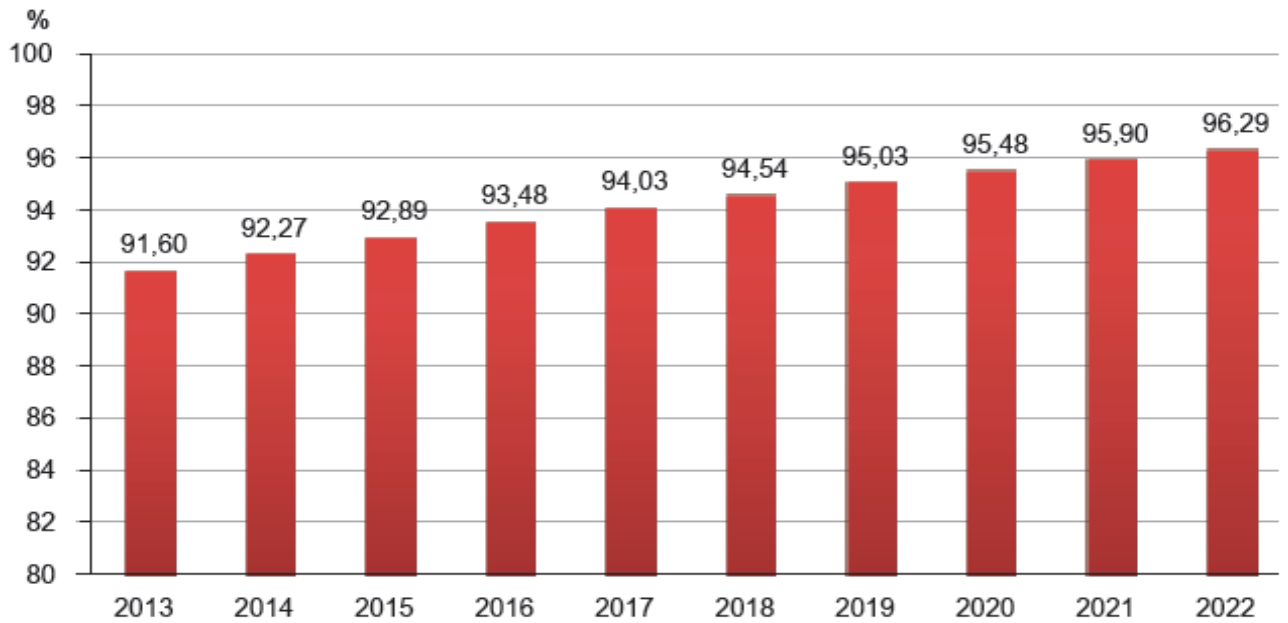


Рис. 1.8. Електрифікація сільських районів 2013-2022 рр.

Споживання електроенергії залежить від кількості людей, що проживають у тій чи іншій місцевості. Останній перепис населення в Еквадорі був проведений у 2010 році [26]. На його основі, враховуючи приріст населення було проведено розрахунок споживання електроенергії однією особою у 2015 році. Споживання електроенергії однією людиною на рік по провінціях наведений на рис. 1.9 [27].

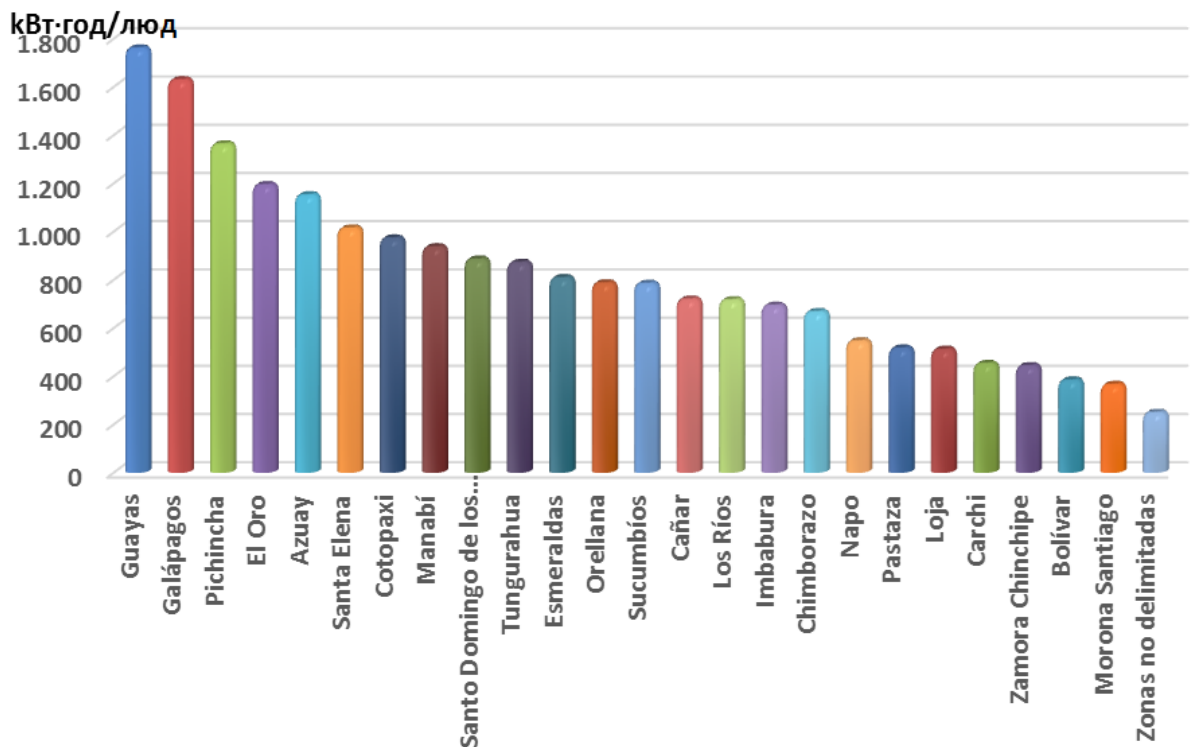


Рис. 1.9. Споживання електроенергії 2015 р.

Середнє споживання електроенергії домогосподарствами складає біля 2,3 кВт·год/доб, і цей показник з часом буде зростати (табл. 1.7).

Таблиця 1.7

Середнє споживання енергії домогосподарствами в країні.

Район	середнє споживання, кВт·год/доб.
Гірський	2.162
Амазонка	1.593
Узбережжя	2.902
Острівний	4.524
Не визначеної територіальної належності	0.692

Використання ВДЕ визнано одним із пріоритетів державної енергетичної політики в Еквадорі. Це зумовлено дефіцитом електроенергії, особливо у віддалених від центру районах, зростанням чисельності населення та вартості традиційних видів палива, яке відчутно подорожчало останнім часом.

Крім того, в країні спостерігається постійне зростання потреби в електроенергії. З розвитком села росте використання енергії у домогосподарствах, в сільському виробництві, ремісництві, торгівлі, у промисловості та туристичних об'єктах. Забезпечити такі потреби у традиційний спосіб через лінії електропередач інколи досить складно через важкодоступність районів. Крім того це - дорого. А оскільки у селах проживає населення з низьким рівнем статків, там намагаються заощаджувати на електриці. Встановлення ж ВЕУ дасть змогу людям отримувати електроенергію.

1.4. Автономні вітроустановки в Еквадорі

Розвиток автономних вітроустановок відіграє важливу роль в електрифікації сільської місцевості Еквадору з використанням ВДЕ. В рамках приєднання віддалених місць проживання до електромережі CONELEC було здійснено ряд програм з електрифікації сільських і приміських районів (FERUM). Серед інших проект EURO-SOLAR (електрифікація в сільських районах з ВДЕ в

ізолюваних місцевостях Еквадору), який було впроваджено здебільшого у важкодоступних районах Амазонки. В його рамках у віддалених частинах країни було встановлено ряд сонячних панелей. Підключати традиційні електромережі до цих зон не вигідно через техніко-економічні складнощі та негативний вплив їх на навколишнє середовище [2].

Нині програм розвитку автономних систем вітроустановок в Еквадорі практично не існує. На це є ряд причин:

- найбільший вітровий потенціал здебільшого знаходиться не над континентальною частиною країни;
- існує надто мало інформації про швидкість вітру, над потенційними перспективними ділянками для встановлення автономних систем вітроустановок;
- немає повної інформації з техніко-економічними показниками, які можна використати для потенційних інвесторів;
- в Еквадорі не налагоджено виробництво ВЕУ, тому для їх встановлення, більшу частину деталей слід експортувати;
- не існує державних нормативів для будівництва та встановлення сонячних, вітрових та гідравлічних систем, що можуть гарантувати якісну та безперебійну роботу енергосистем [28].

Генерування електричної енергії за допомогою автономних систем ВЕУ – це перспективний ринок, що розвивається останніми роками у всьому світі [29]. Потужність, за якою класифікують ці системи, визначають від 1 кВт, 20 кВт до 100 кВт. Автономні системи ВЕУ вигідні, оскільки їхня вартість під час встановлення та обслуговування досить невисока. Враховуючи економічні переваги ВЕУ, можна говорити про стабільне використання автономних систем у сільській місцевості та районах, що розвиваються. Також автономні системи передбачають вигоду і для самих споживачів. Адже впровадження централізованої системи розподілу електроенергії в ізолювані райони надто дороге, натомість децентралізація від неї, дасть змогу споживачам економити [16].

Використання вітрового потенціалу Еквадору, який достатньо високий у гірських районах та прийнятний на певних ділянках узбережжя, виглядає досить вигідним та перспективним на рівні сонячних та гідро джерел енергії.

Використання автономних систем ВЕУ в Еквадорі можуть пришвидшити електрифікацію у сільських районах, а це, відповідно, підвищить рівень життя у сільських районах та дасть поштовх для розвитку села та приміських зон. За допомогою отриманої електроенергії жителі зможуть підключитись до систем телекомунікацій, вуличного освітлення, використовувати електрику в сільському господарстві, ремісництві, торгівлі та промислового виробництва.

Однак, слід зауважити, не всі райони, що потребують електрифікації мають високий вітровий потенціал. Тому, проектуючи електрифікацію цих місцевостей, необхідно розраховувати комбіновані системи, які б однаково працювали використовуючи силу вітру, сонця та дизелю.

1.5. Порівняльний аналіз генераторного обладнання, що входить до складу вітроелектричних установок

Генераторне обладнання вітроелектричних установок в основному будується на використанні синхронних і асинхронних машин. Дослідженню режимів роботи даного електрообладнання присвячено низку робіт таких вчених як Іванов А.А., Ліщенко А.І., Лісник В.Я., Мазуренко Л.І., Васько П.Ф., Вишневський Л.В., Бохян С.К., Радін В.І., Торопцев Н.Д., Джендубаєв А-З.Р., та ін.

В останній час, найбільше розповсюдження набули синхронні генератори з магнітоелектричним збудженням, що за своїми характеристиками переважають синхронні генератори з електромагнітним збудженням. Вони відносяться до класу безконтактних електричних машин, мають високу надійність, ККД, відносно просту конструкцію, покращені вихідні характеристики, малу інерційність при перехідних процесах. Але синхронні машини з магнітоелектричним збудженням мають і недоліки: відсутність прямого способу регулювання напруги із-за складної зміни потоку збудження від постійних

магнітів, розкид характеристик магнітів, залежність техніко-економічних показників від магнітних властивостей постійних магнітів.

Асинхронні генератори порівняно із синхронними мають наступні переваги [30]:

- при короткому замиканні в колі навантаження проходить втрата збудження, що виключає необхідність використання апаратури для захисту генератора; час відновлення напруги після короткого замикання не перевищує 1с;

- при роботі на несиметричне навантаження короткозамкнута стрижнева система ротора виконує роль демпферної обмотки, що дозволяє отримувати необхідні якісні показники електроенергії при несиметричному режимі;

- вмикання на паралельну роботу синхронного генератора доволі складна і відповідальна операція. В той же час вмикання асинхронного генератора на паралельну роботу не вимагає підключення складної додаткової апаратури, а синхронізація генератора зводиться до вирівнювання їх частот і напруги;

- при використанні в багатоагрегатних системах існує можливість структурно-схемними рішеннями оптимізувати систему за масогабаритними та енергетичними показниками.

В той же час асинхронні двигуни, що використовують в генераторному режимі, порівняно з синхронними мають низький ККД і круто падаючу зовнішню характеристику [31]. Асинхронні генератори забезпечують достатню надійну роботу з високою стабільністю заданої напруги і перенавантажувальною здатністю тільки при певних умовах. Коефіцієнт насичення магнітного кола генератора, як відношення повної намагнічуючої сили магнітного кола до намагнічуючої сили повітряного проміжка, повинен знаходитися в межах 2,8...4, що дозволить покращити робочі характеристики та підвищити ККД асинхронного генератора.

Основними показниками порівняння асинхронних генераторів з синхронними, окрім забезпечення необхідних вихідних параметрів (потужність, напруга, струм, частота), є маса, вартість, ККД та надійність в роботі. Якщо не враховувати збуджуючих пристроїв, то маса асинхронних машин значно менше

синхронних. Це пояснюється тим, що в асинхронній машині менший повітряний зазор, стрижні ротора легше розташовувати, ніж котушки збудження, умови охолодження зосередженої обмотки збудження синхронної машини гірші, ніж у короткозамкненій обмотці ротора, якій не потрібна ізоляція.

Маса асинхронних машин менша в $1,3 \div 1,4$ рази, ніж у синхронних. Порівняно з безконтактними синхронними генераторами цей показник становить $2 \div 3$ рази [32]. В той же час, якщо порівнювати масу збудників синхронних машин і масу статичних конденсаторів, то застосування асинхронних генераторів з точки зору техніко-економічних показників стає неоднозначним.

Робота асинхронного генератора в автономному режимі супроводжується рядом умов, що полягають в необхідності мати джерело реактивної потужності для самозбудження – статичні конденсатори, синхронні компенсатори, що збільшує загальну вартість. Напруга на клеммах генератора з конденсаторним збудженням залежить від навантаження та швидкості обертання ротора, що призводить до необхідності регулювання потужності конденсаторів. Раніше вважалось, що при забезпеченні коефіцієнта потужності $\cos\varphi=0,9\dots0,98$, межа ефективної роботи асинхронного генератора в автономному режимі не перевищувала $15\dots20$ кВА [33,32]. Проте подальші дослідження вказують, що в зв'язку з підвищенням якості та зменшення вартості конденсаторів ця межа може бути суттєво розширена [34].

Jose Antonio B., Robert G., Hugo V [35] пропонують систему де використовується електронний перетворювач, що компенсує гармонійне подання реактивної потужності, та підтримує баланс під час перевантаження активної потужності. Swati [36] пропонує метод, що полягає в розв'язанні поліному четвертого порядку, який використовується для визначення мінімального значення ємності конденсатора (C). У зв'язку з необхідністю підвищення ефективності системи, вдосконалення її роботи та регулюванні його параметрів (напруга, частота) ряд досліджень проведено Jyotirmayee D. and Kanungo B. M. [37]. Вони пропонують математичну модель для визначення мінімального значення ємності конденсатора для подання реактивної потужності під

навантаженням та без нього. Автор Т. Ахмед зосереджується в своїй роботі [38] на удосконаленні вибору параметрів блоку конденсаторів.

Робота асинхронного генератора паралельно з центральною енергосистемою усуває недоліки, що пов'язані з конденсаторним збудженням, оскільки реактивна потужність споживається з мережі. На відміну від автономної роботи, швидкість обертання його ротора практично не впливає на швидкість обертання магнітного поля статора. Крім того, зміна навантаження енергосистеми, враховуючи її велику потужність, фактично не впливає на режим роботи асинхронного генератора. Також при паралельній роботі з мережею не треба проводити синхронізацію генератора, що збільшує його маневреність. У момент увімкнення асинхронного генератора в систему з підвищенням обертання ротора в межах $\pm 10\%$ відносно синхронної, вплив генератора на режим роботи системи за активною потужністю не значний і коливання в ній практично не виникають.

1.5.1. Аналіз способів регулювання частоти та напруги асинхронного генератора вітроелектроустановки

При зміні швидкості ротора ВЕУ та навантаження напруга на клеммах генератора може змінюватись в широких межах. Ступінь складності регулювання залежить від виду навантаження: при активному, порівняно з індуктивним, стабілізація напруги при змінній швидкості обертання нескладна. При навантаженні генератора і незмінній частоті обертання ротора (n_2) частота обертання магнітного поля складає:

$$n_1 = \frac{n_2}{1 - s}, \quad (1.1)$$

і зменшується, оскільки при генераторному режимі на стійкій частині механічної характеристики ковзання $s < 0$. Зміна частоти f_1 при переході від холостого ходу до номінального навантаження складає:

$$\Delta f_1 = \frac{\varphi \cdot n_2 \cdot s_{ном}}{1 - s_{ном}}, \text{ або } \Delta f_1 = \frac{100}{f_{1ном}} = 100s_{ном} (\%), \quad (1.2)$$

тобто відносна зміна частоти чисельно дорівнює ковзанню (поданому у відсотках). Для підтримання частоти $f_1 = const$ при збільшенні навантаження необхідно відповідно збільшувати n_2 .

Заступна схема асинхронного генератора з конденсаторним збудженням наведена на рис 1.10.

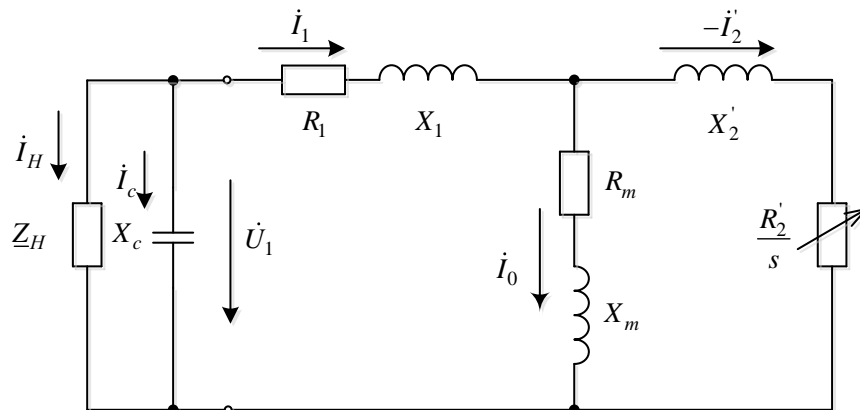


Рис. 1.10. Заступна схема асинхронного генератора з навантаженням

При зростанні струму навантаження, при будь-якому виді навантаження, напруга генератора зменшується в результаті зростання падіння напруги в обмотці статора та зниження е.р.с., як результат зменшення магнітного потоку машини. В останньому випадку з ростом струму навантаження збільшується опір намагнічуючого контуру (x_m), що призводить до зменшення намагнічуючого струму (I_μ).

Для стабілізації напруги генератора при змінному навантаженні можна регулювати частоту обертання ротора або магнітний потік машини зміною реактивної потужності, що надходить від конденсаторів. Якщо генератор працює при змінній частоті обертання на індуктивне навантаження, то ємність конденсаторів залежить від частоти обертання ротора. При зменшенні частоти обертання ротора різко зростає необхідна величина ємності конденсаторів, але в кожному випадку необхідно враховувати параметри вибраної машини.

Платиха О.Г. [39] пропонує математичне моделювання схеми автономної ВЕУ на базі АГ з самозбудженням тиристорним регулятором напруги. Дана система, що регулює напругу на затискачах АГ передбачає для точності стабілізації напруги, використання серійних тиристорних перетворювачів,

простих та надійних в експлуатації.

Підбір необхідної ємності виконують за умови $C = C_{ном} \left(\frac{n_2}{n_{ном}}\right)^2$, при $n_2 \geq n_{2ном}$ і $C = C_{ном} \left(\frac{n_2}{n_{ном}}\right)^4$, при $n_2 < n_{2ном}$. Дані умови вказують, що автономні асинхронні генератори доцільно використовувати при значенні $n_2/n_{2ном} \geq 0,9$. При менших значеннях n_2 необхідна величина ємності різко зростає і генератор повністю завантажується реактивним струмом.

Для стабілізації напруги генератора, що працює при змінній частоті обертання та навантаженні, здійснюють періодичне під'єднання додаткової ємності за допомогою тиристорного регулятора, трансформатора зі змінним коефіцієнтом трансформації, схеми ємнісного збудження з регулятором індуктивного струму асинхронного генератора [40]. Слід зауважити, що при цьому збільшується складність загальних схем, масогабаритні параметри, що призводить до відповідного зростання вартісних та експлуатаційних показників.

1.5.2. Аналіз режимів роботи асинхронних генераторів вітроелектроустановок

Роботу асинхронного генераторного обладнання ВЕУ можна розбити на наступні режимні етапи:

- початок генераторного режиму за рахунок самозбудження;
- стабілізація напруги системи при зростанні навантаження і при незмінному моменту на валу ротора;
- стабілізація напруги системи при зниженні моменту на валу турбіни і незмінному навантаженні.

Початок роботи асинхронного генератора за рахунок самозбудження. Автономний режим роботи при експлуатації ВЕУ вимагає надійного початкового збудження генератора. Початкове самозбудження автоматично забезпечується при досягненні критичної частоти обертання вала ротора, яка на 20...30% нижче номінальної частоти обертання ротора ВЕУ [33]. В реальних умовах експлуатації

системи збудження асинхронних генераторів повинно забезпечити робоздатність енергообладнання ВЕУ при зміні частоти обертання вала ротора, що викликана коливанням потужності навантаження, швидкості вітру.

Математична модель енергоблока ВЕУ з асинхронним генератором складається з алгебраїчних рівнянь в осях α і β [41]:

$$R^s I_\alpha^s - \omega_1 (L^s I_\beta^s + L^{sR} I_\beta^R) + U_\alpha^s = 0, \quad (1.3)$$

$$R^s I_\beta^s + \omega_1 (L^s I_\alpha^s + L^{sR} I_\alpha^R) + U_\beta^s = 0, \quad (1.4)$$

$$R^s I_\alpha^s - (\omega_1 - \omega) (L^R I_\beta^R + L^{sR} I_\beta^s) = 0, \quad (1.5)$$

$$R^R I_\beta^R - (\omega_1 - \omega) (L^R I_\alpha^R + L^{sR} I_\alpha^s) = 0, \quad (1.6)$$

$$L^s - f(\psi^2) = 0, \quad (1.7)$$

$$M - p_n L^{sR} (I_\beta^s I_\alpha^R - I_\alpha^s I_\beta^R) = 0, \quad (1.8)$$

де M – електромагнітний момент;

p_n – число пар полюсів;

R^s, R^R – активний опір, відповідно, статора і ротора;

L^s, L^R – індуктивності обмоток, відповідно, статора і ротора ;

I^s, I^R – струми, відповідно, статора і ротора за осями α і β ;

Ψ – потокозчеплення;

ω_1, ω – електрична частота обертання, відповідно, ротора і статора.

Ємнісна провідність конденсатора b_c і сумарна індуктивна еквівалентна провідність b_e компенсатора, що приєднані до обмотки машини, розташованій за віссю β , а сумарна активна провідність g_e – за віссю α . Еквівалентні провідності g_e і b_e дорівнюють сумі провідностей навантаження g_n і b_n , втрат в машині g_m, b_m і тиристорному компенсаторі g_k і b_k .

$$\frac{I_\beta^s}{b_c - b_e} - U_\beta^s = 0, \quad (1.9)$$

$$\omega_1 c - b_k - \frac{1}{\omega_1 L_n} - \frac{1}{\omega L^s} = 0, \quad (1.10)$$

$$\frac{I_{\alpha}^s}{g_e} - U_{\alpha}^s = 0. \quad (1.11)$$

Тиристорний компенсатор служить для споживання надлишкового ємнісного струму, тому його параметри визначаються як

$$g_k = \frac{P}{U_1}, \quad (1.12)$$

$$b_k = \frac{Q}{U_1}, \quad (1.13)$$

де P і Q – активна і реактивна складові потужності, що споживаються перетворювачем.

Явище переходу асинхронної машини з двигунного в генераторний режим при обертання її валу зі швидкістю, що перевищує синхронну, широко висвітлюється в літературі, коли розглядається автономна робота асинхронного генератора з конденсаторним самозбудженням. В той же час природа цього явища описується по-різному.

Проведений аналіз різних робіт Samah Hammadi, Nouredine Hodouri та Lassaad Sbita [42], які досліджують тему використання ВЕУ з АГ з самозбудженням для автономних систем, вказує на те, що більшість дослідників пропонують схему керування прямим моментом на базі ВЕУ з АГ, чим забезпечують навантаження з постійним струмом (ПС). Це відбувається за допомогою силового комутаційного випрямляча, BUS постійного струму та понижуючого перетворювача напруги. Mayurappriyan, K. Rajambal, S. Chellamuthu and J. Jerome [43] розробили схему АГ з двох нейрон-контролерів, за допомогою якої можна отримати максимальну потужність з максимальним використанням енергії вітру для активного навантаження та проводити регулювання вихідної напруги з чутливим навантаженням.

Параметричним резонансом називають ріст струму в коливальній системі, в якій відсутнє видиме джерело ЕРС при періодичній зміні якогось її параметру [44]. Відсутність джерела живлення і ріст струму та напруги в лінійній коливальній системі, при наявності втрат в ній є характерною ознакою

параметричного резонансу. Згідно з теорією параметричного резонансу умовою виникнення, розвитку та встановлення коливань пов'язаних з певним налаштуванням на резонанс контуру, що забезпечує нестійкість його до малих збурень, з періодичною зміною параметра контуру, при якому забезпечується введення активної потужності, що перевищує її розсіювання і з наявністю в ній елементів з суттєвою нелінійністю.

Ashish Kumar Swain, Sushanta Kumar Senapati [45] пропонують модель так званого просторового стану для аналізу динамічної поведінки системи асинхронного генератора з самозбудженням (АГ з СЗ). Модель подано в координатах dq з кривою намагнічування. Eltamaly A.M [46] запропонував новий метод для визначення мінімального значення ємності (конденсаторів) для самозбудження. Ткачук В.І, Копчак Б.Л [47] розробляли лінеаризовану модель АГ з самозбудженням, що дозволяє аналізувати вплив на нього різних збурювальних впливів. Вони ж на базі результатів експериментальних досліджень, запропонували інший підхід для визначення передавальної функції асинхронного генератора (ПФ АГ) з самозбудженням в каналі збурення за струмом збудження.

Трактовка самозбудження за рахунок підтримання енергетичного балансу витікає із розгляду асинхронного генератора як коливальної системи. Її робота можлива при виконанні умов балансу амплітуди й фази або активної та реактивної потужностей, суть яких пояснюється наступним:

- енергія, що надходить в коливальний контур, повинна дорівнювати тій, що витрачається в тому ж контурі;
- надходження енергії в коливальний контур повинно проходити одночасно з її витратами.

Важливим фактором, що визначає виникнення автоколивань з усталеною амплітудою є наявність нелінійного елемента в контурі. В даній системі «машина-ємність» є наявність всіх елементів автоколивальної системи.

Джерелом енергії є привідний двигун (в нашому варіанті ротор вітроустановки); перетворювач, що забезпечує надходження електроенергії в такт

з коливаннями контурами – роторне коло асинхронного генератора; коливальна система – контур із ємності конденсатора та індуктивностей машини; зворотний зв'язок забезпечується за рахунок індуктивного зв'язку між колами статора і ротора та залежність індуктивності ланцюга збудження від магнітного потоку.

Таким чином, електрична машина з самозбудженням становить систему динамічно не стійку в стані спокою і яка не вимагає початкового поштовху. Першочерговий імпульс може з'явитися як із боку статора, так і з боку ротора. Цим імпульсом може бути залишковий магнетизм.

Рівнянням рівноваги фаз статора і ротора при увімкненій ємності на затискачах статора має вигляд [48]:

$$\begin{cases} \frac{1}{C} \int i dt + \frac{d(L_1 i_1)}{dt} + r_1 i_1 = -\frac{d\psi_{12}}{dt}, \\ \frac{d(L_2 i_2)}{dt} + r_2 i_2 = -\frac{d\psi_{21}}{dt}, \end{cases} \quad (1.14)$$

де L_1, L_2 – повні індуктивності статора та ротора;

ψ_{12}, ψ_{21} – потокозчеплення взаємоіндукції статора та ротора.

Точне рішення даної системи для реальної машини ускладнене, оскільки величина індуктивності залежить від амплітуди струмів в системі. Якщо системі надати малі нарощування і проаналізувати, то:

$$i_1 = \dot{I}_1 e^{(\alpha + j\omega)t}, \quad (1.15)$$

$$i_2 = \dot{I}_2 e^{(\alpha + j\omega s)t}, \quad (1.16)$$

де α – показник зростання коливань;

ω – частота струмів статора;

s – ковзання ($s = 1 - \omega_p/\omega$).

Зв'язок показника зростання коливань з параметрами системи визначається як:

$$\alpha = \omega_\delta \frac{r_2(x_1 - x_c)}{x_m^2 - x_2(x_1 - x_c)}, \quad (1.17)$$

де $x_1 = \omega L_1$; $x_2 = \omega L_2$; $x_m = \omega L_m$; $x_c = 1/\omega C$.

Стабілізація напруги системи при зростанні навантаження і при незмінному моменті на валу турбіни. При постійній частоті обертання первинної машини стабілізація напруги асинхронного генератора досягається наступними методами [49]:

- компаундуванням збудження;
- підмагнічуванням спинки статора генератора;
- зміною напруги на конденсаторах;
- застосуванням ферорезонансного стабілізатора напруги;
- використанням керованих дроселів насичення;
- застосуванням варикондів;
- ступінчастою зміною ємності шунтуючих конденсаторів.

Із вище перерахованих методів найбільш часто на практиці реалізується останній, коли кожний електроспоживач має індивідуальний конденсатор, ємність якого дозволяє компенсувати зниження напруги при під'єднанні його до генератора.

Стабілізація напруги системи при зниженні моменту на валу. При застосуванні асинхронних генераторів у складі ВЕУ він підлягає дії як з боку навантаження (збільшення або зниження), так і з боку зменшення швидкості вітру. Для побудови зовнішньої характеристики при режимі падіння швидкості вітру на роторі подамо заступну схему у вигляді, як на рис. 1.11 [50].

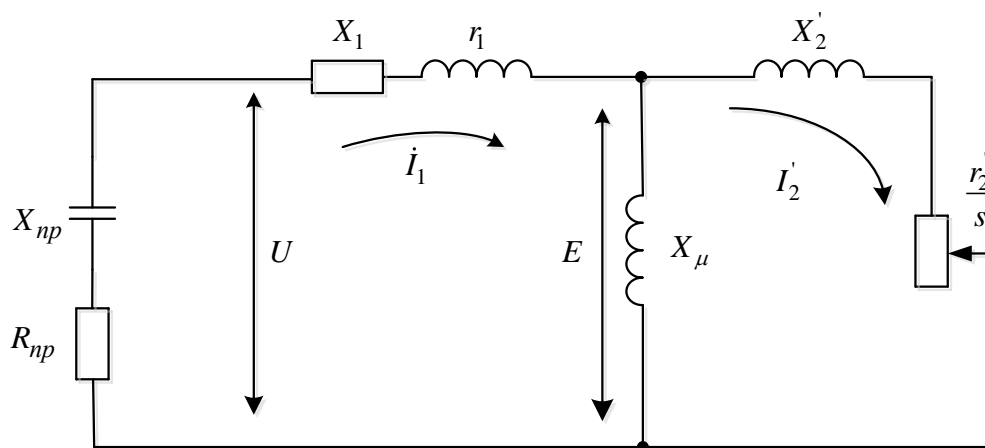


Рис. 1.11. Заступна схема асинхронного генератора з приведеними опорам.

$$\text{На схемі } R_{np} = \frac{R_H x_c}{R_H^2 + (x_H - x_c)^2}, x_{np} = -\frac{[R_H^2 + x_\mu (x_H - x_c)] x_c}{R_H^2 + x (x_H - x_c)^2}.$$

Аналіз даної схеми зводиться до визначення впливу ємності конденсаторів на реактивний опір ланки намагнічування x_m . Якщо навантаження задане, то x_m і ковзання s визначаються як:

$$\begin{cases} x_m = -\frac{(x_{np} + x_1)^2 + (R_{np} + r_1)^2 + 2(x_{np} + x_1)x_2 - \sqrt{[(x_{np} + x_1)^2 + (R_{np} + r_1)^2]^2 - 4(x_2')^2 (R_{np} + r_1)^2}}{2(x_{np} + x_1 + x_2)}, \\ s = \frac{r_2'(R_{np} + r_1)}{(x_{np} + x_1)x_2' + (x_{np} + x_1 + x_2')x_m}. \end{cases} \quad (1.18)$$

Зниження швидкості вітру і падіння потужності на валу ротора призводить до зниження напруги та зниження реактивного опору. Введення додаткової ємності знижує приведений активний опір і практично не впливає на приведений реактивний, що і дає можливість виконати умову $x_0 \geq x_c$.

Попередні роботи з дослідження ВЕУ, мають свої недоліки та переваги залежно від конструкційних схем, але їх направленість має за мету удосконалення надійності роботи систем з ВЕУ. Вплив природних умов на роботу систем з ВЕУ з асинхронним генератором оцінюється вітровим режимом республіки Еквадор, що характеризується різкою зміною швидкості вітру та довго і короткочасними тривалостями поривів вітру залежно від районів країни (здебільшого у віддалених від центральних мереж локаціях).

1.6. Мета і задачі дослідження

Мета дисертаційних досліджень полягає у визначенні режимів роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором за метеорологічних умов Еквадору.

Для досягнення мети вирішувалися наступні задачі:

– проведення оцінки вітроенергетичного потенціалу та енергоспоживання у всіх районах Еквадору;

- обґрунтування структурних схем автономних ВЕУ з асинхронним генератором;
- розробка та аналіз математичної моделі вітроелектричної автономної установки з асинхронним генератором за умов стійкості;
- розробка імітаційної моделі автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором для визначення її параметрів режиму роботи;
- розробка імітаційної моделі автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором з підключенням імпульсного перетворювача для визначення її параметрів режиму роботи;
- проведення стендових досліджень режимів роботи автономної вітроелектричної установки.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ З АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ ДЛЯ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ ЕКВАДОРУ

2.1. Розробка методики та оцінка вітропотенціалу Еквадору

Екваторіальне розташування Еквадору та масивний гірський хребет Анд, що пролягає територією республіки, обумовлює наявність різних кліматичних зон та ландшафтне розмаїття. Зважаючи на все це, використання вітру є досить перспективним та вимагає детального вивчення можливостей сили вітру, у кожному окремо узятому регіоні. На даний момент подібних розрахунків недостатньо.

Для правильного визначення потенціалу того чи іншого регіону, важливо розглядати конкретну місцевість окремо, враховуючи саме її розташування, температуру повітря, віддаленість чи наближення до океану та великих міст, наявність гір, зміну температурного режиму, тривалість світового дня, сезону тощо. Головними критеріями під час даної оцінки мають стати: орографія, густина повітря, висота місцевості над рівнем моря. Враховуючи зовнішній вплив, визначають дані вітрового потенціалу. І вже отримавши повну характеристику сили вітру, оцінити правильне та ефективне розташування нових вітростанцій.

Для оцінки швидкості вітру були прийняті наступні припущення [10]:

- враховано, що на всіх пунктах немає суттєвих перешкод, що впливають на напрям вітру;
- низька рослинність, що є частиною того чи іншого регіону, не взята до уваги, як перешкода для вітру, так як її наявність вже врахована у моделі;
- ізольовані будинки або дерева, що знаходяться на відкритій місцевості вважаються перешкодою;
- параметри шорсткості можуть бути змінені через наявність будинків або високих дерев.

Діюча вітрова карта Еквадору представляє собою дані про середньорічну швидкість вітру для всіх регіонів країни з високою роздільною здатністю 200x200 м. Для її створення були використані дані з усіх існуючих цифрових карт, що характеризують природне середовище того чи іншого регіону. Крім того, враховано ресурси геопозиціонування, взяті до уваги розрахунки за допомогою кривих потужності продуктивності й вироблення електроенергії вітрових турбін, оцінено потенціал використання вітру у народному господарстві, визначено найбільш перспективні для цього райони [10].

Для оцінки доцільності встановлення автономних вітроустановок в ізольованих домогосподарствах сільської місцевості Еквадору, найбільш важливим є наявність достатньої потужності вітрового потоку в таких місцях.

На сьогодні аналіз даних потоків провести доволі складно. Так, наприклад, в Атласі Еквадору (AWS True Power) наведені середні дані про швидкість вітру, на висоті 50 м над землею, табл. 2.1.

Початкова робота з встановлення вітроагрегатів має початися зі збору необхідної детальної інформації з усіх можливих джерел. Одне із таких, найбільш повних джерел про швидкість вітру та клімат Еквадору по регіонах є звіт ІННАМІ (Національний інститут метеорології і гідрології) за 2012 рік [11]. Свої заміри Інститут робить на базі сучасних метеостанцій. Отримана спеціалістами Інституту інформація, призначена для використання аграрними підприємствами, об'єктами народного господарства. Однак, слід зауважити, що оцінка вітрового потенціалу Інституту не є достатньою. Наприклад, проаналізовані значення за період 1990-2011 років, дають середню швидкість 3,8 м/с, але більшість метеостанцій Інституту знаходяться не в місцях, потрібних для оцінки вітрового потенціалу і не відповідають необхідним вимогам за висотою розташування анемометрів. Висота встановлення кожної з вишок не перевищує 10 м, а на деяких станціях вони досягають лише 2-х метрів над поверхнею землі [11].

Ще одним джерелом інформації є дані, отримані з програмного забезпечення RETScreen, що містять дані НАСА [15]. Ними наведено дані про середньорічну швидкість вітру на висоті 10 м з шорсткістю земної поверхні

0,005 м.

Таблиця 2.1

Середньорічні значення швидкості вітру по провінціях

ГІРСЬКІ ПРОВІНЦІЇ	$V_{\text{сер}}$ на рік, м/с	ПРОВІНЦІЇ АМАЗОНКИ	$V_{\text{сер}}$ на рік, м/с
Карчі	>7	Сукумвіос	<3
Імвавура	>7	Напо	<3
Пічінча	>7	Пастаза	<3
Котопаксі	>7	Орельяна	<3
Тунгурауа	>6	Морона Сантіаго	<3
Волівар	>7	Замора Чінчіпе	>7
Чімворазо	>7		
Каніар	>7		
Азуай	>7		
Лоха	>7		
Сто. Домінго де лос Цачілас	<3		
ПРОВІНЦІЇ УЗБЕРЕЖЕННЯ	$V_{\text{сер}}$ на рік, м/с	ОСТРОВИ	$V_{\text{сер}}$ на рік, м/с
Есмералдас	<4	Галапагос	>5
Манаві	<4		
Гуаяс	<4		
Лос Ріос	<4		
Ел Оро	<4		
Санта Елена	<4		

З даних відкритих джерел було розроблено графік розподілу швидкості вітру в місяцях з урахуванням того, що в гірських районах сила вітру залежить від сезону. Наприклад, більш сильні вітри з'являються з приходом сухого сезону (рис. 2.1).

Проаналізувавши діаграму рис.2.1, можна стверджувати, що сила вітрів у кожному регіоні не є сталою, а залежить від сезону та географічних характеристик самого місця. Наприклад, в таких гірських провінціях як Іввара,

Амбато, найбільш потужні вітри з'являються між червнем та вереснем.

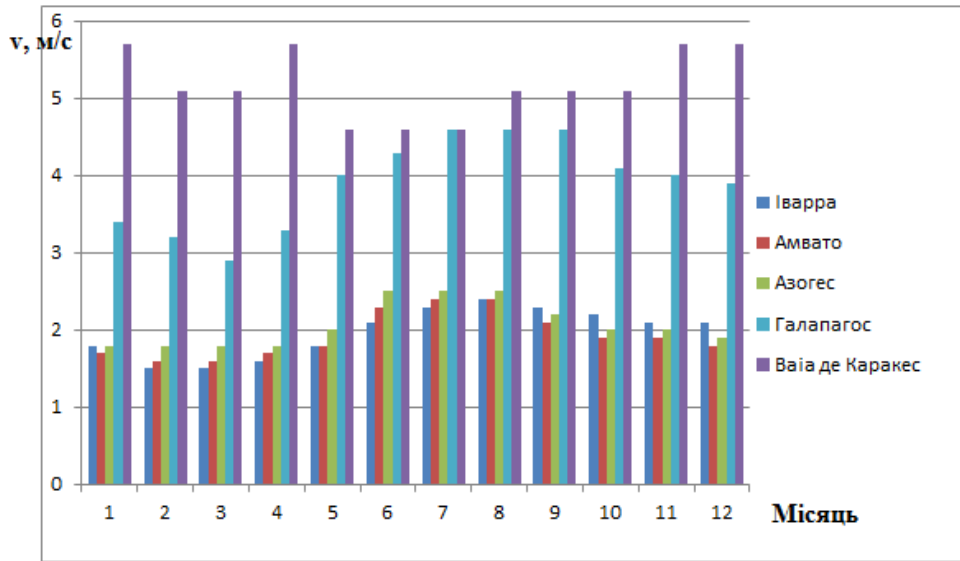


Рис. 2.1. Розподіл середньої швидкості вітру за місяцями для різних провінцій Еквадору.

На узбережжі досить характерними є два сезони – сезон дощів та сезон посухи. Дощовий сезон починається в грудні і продовжується до травня. У цей час найбільше дощів випадає з лютого до квітня. Сухий сезон починається у кінці травня і триває до вересня. Наприклад, Ваїа де Каракес, що на узбережжі, де чітко простежується поведінка вітру залежно від пори року.

Проведені дослідження Henry Galvez [51] аналізують поведінку вітру в цілому на узбережжі як на півночі, так і на півдні. На північній частині узбережжя панують вітри, що діють з північно-західної сторони, де середня швидкість вітру менше, ніж 3 м/с. Трохи південніше, близько метеостанції Есмеральдас, вітер набуває сили і діє у південно-західному напрямку зі швидкістю більше за 4 м/с. В центрі узбережжя, поблизу містечка Манта та Ла Лівертад, де територія знаходиться під морським впливом, напрям вітру змінюється до південно-західного та діє зі швидкістю понад 4 м/с. Та сама ситуація спостерігається в Ла Лівертад. Вже в південній частині узбережжя (Гуаякіль, Пуерто Волівар, Пуна) вітер є більш змінним. Поблизу Гуаякіля, що розташований на березі затоки, атмосфера знаходиться під великим впливом морських вітрів. Зважаючи на розташування міста, вітри на його території не перевищують 3 м/с. Метеостанції поблизу міста Пуна, відмічають швидкість

вітру на рівні 3 м/с. Його переважний напрямок – західний.

Перелік потенційних пунктів різних провінцій для розташування автономних вітроустановок наведений в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Перелік провінцій, де можливе ефективне розташування автономних вітроелектричних установок.

ПРОВІНЦІЯ	Пункт розташування	$V_{\text{сер}}$ на рік, м/с	ПРОВІНЦІЯ	Пункт розташування	$V_{\text{сер}}$ на рік, м/с
Карчі	Ла Лівертад	5,1	Котопаксі	Тіксан	6,3
	Ел Ангел	5,4		Зумвагуа	6
	Гарсія Морено	5,9		Тігуа	6
		6,3		Гуангахе	6,5
	Сруз	8		Гуінгопана	6,3
	Лос Андес	7,6			Онія
Іварра	Пімампіро	5,22	Азуаї	Пурін	6,1
	Юракруз	6,3		Лас Ніевес	5,18
Пічінча	Олмедо	5			Навон
	Монхас Алто	6,5			
	Кангауа	6,5			
		8,4			
	Піфо	5,9			
		5			
		5			
	Пінтаг	5			
Порвенір	6,3				

Для ефективного використання потенціалу вітру та правильного встановлення ВЕУ важливо керуватися інформацією про швидкість вітру на висоті від 20 до 100 м. Однак, характеристики вітру на висоті понад 20 м відсутні,

з усіх вибраних пунктів з табл. 2.2.

Для розрахунків узято дані з Атласу вітрів країни де наведені дані про середньорічну швидкість вітру, заміряну на висоті 50 м. Відомо, що більшість ВЕУ малої потужності встановлюються на висоті 20-30 м. Для цього використовують формулу розрахунку, що дозволяє розрахувати швидкість вітру на потрібній висоті.

Відповідно до вибраних потенційних пунктів розташування автономних вітроустановок, знайдені характеристики вертикального профілю вітру (зміну величини його швидкості за висотою) за формулою, запропонованою Д.Т. Лайхтманом [52,53]:

$$v = v_1 \frac{\log\left(\frac{h}{h_0}\right)}{\log\frac{h_1}{h_0}}, \quad (2.1)$$

де: v – шукана швидкість на висоті h ; v_1 – швидкість вітру, що вимірюється біля Землі на висоті h_1 ; h_0 – висота, на якій швидкість вітру дорівнює нулю (вона залежить від шорсткості поверхні для поверхні з низькою травою – 3,2 см; більш високими рослинами – 5...7 см; $h_{0\max} = 20$ см). Результати розрахунків наведені в табл. 2.3:

Таблиця 2.3

Середньорічна швидкість вітру на висоті 20 м

ПРОВІНЦІЯ	Пункт розміщення	$V_{\text{сер}}$ на рік, м/с	ПРОВІНЦІЯ	Пункт розміщення	$V_{\text{сер}}$ на рік, м/с
1	2	3	4	5	6
Карчі	Ла Лівертад	4,4	Котопаксі	Тіксан	5,5
	Ел Ангел	4,7		Зумвагуа	5,2
	Гарсія	5,1		Тігуа	5,2
	Морено	5,5		Гуангахе	5,6
	Сруз	6,9		Гуінгопана	5,5

1	2	3	4	5	6
	Лос Андес	6,6	Азуаї	Онїа	5,5
Імвавура	Пімампіро	4,5		Пурін	5,3
	Юракруз	5,5		Лас Нїевес	4,5
	Олмедо	4,3		Навон	4,4
Пічїнча	Монхас Алто	5,6			
	Кангауа	5,6			
		7,3			
	Піфо	5,1			
		4,3			
		4,3			
	Пїнтаг	4,3			
	Порвенїр	5,5			

Для отримання найбільш об'єктивної оцінки, яка б слугувала основою для розрахунків з встановлення ВЕУ важливо проаналізувати вітровий потенціал з усіх вибраних пунктів. Однак, за відсутності емпіричних даних, можна оцінити силу вітрового потоку, взявши за основу розрахунків площу 1м^2 та кінетичну енергію вітру.

З отриманих даних про середньорічну швидкість вітру з табл. 2.3 можливо дати оцінку вітрового потоку.

Питома потужність вітрового потоку складе: [52,53,54]:

$$\frac{P}{F} = 0,5 \cdot \rho \cdot v_n^3, \quad (2.2)$$

де F – площа поперечного перерізу,

v_n – номінальна швидкість,

ρ – масова густина повітря.

Потрібно врахувати, що є різні чинники, що впливають на густину повітря.

Тобто густина повітря визначиться як

$$\rho = 1,225 - (1,194 \cdot 10^{-4}) \cdot H, \quad (2.3)$$

де H – висота над рівнем моря.

На карті Еквадору [10] вказана висота над рівнем моря й роза вітрів для всієї території країни рис.2.2.

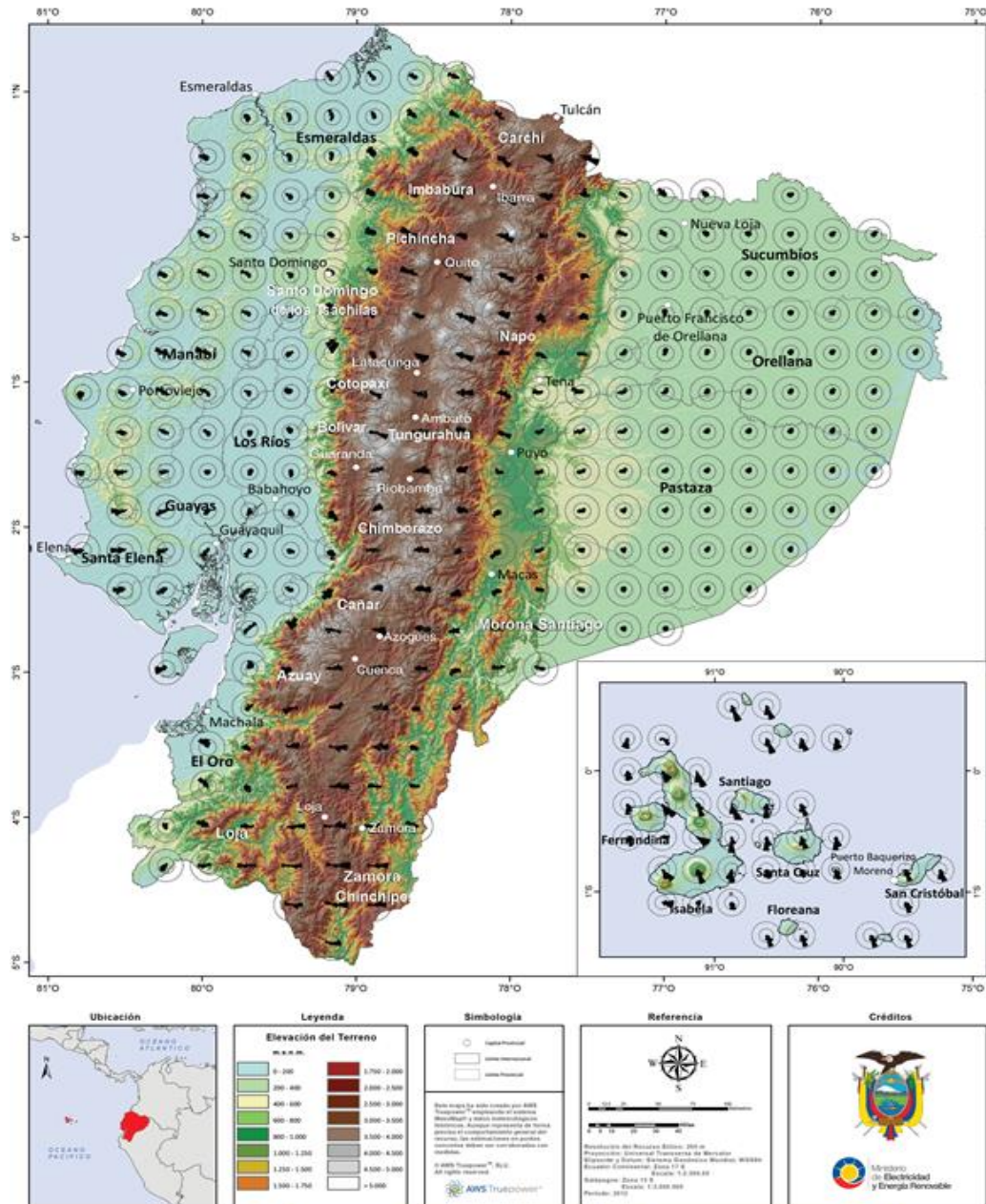


Рис. 2.2. Карта висоти над рівнем моря для території Еквадору

Еквадор не є країною, де дують сильні та постійні вітри. Його географічне розташування зумовлює помірну швидкість вітру. Виключенням є гірські райони, в яких вже діють проекти з використання сили вітру. Там розташовують вітроелектричні станції великої потужності.

Основним джерелом інформації для встановлення вітроустановок та пошуку найбільш ефективних локацій для них як автономних систем є Атлас вітрового потенціалу, який входить в програмне забезпечення ARTPOWER, а також інструмент програмного забезпечення Google-Maps. Швидкість вітру на цих картах подана на висоті 50 м від рівня землі [10]. При виборі місць для розташування ВЕУ також враховувалось, що системи будуть розташовані недалеко від населених пунктів. Результати розрахунку, що оцінюють вітровий потік, наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Питома потужність вітрового потоку.

ПРОВІНЦІЯ	Пункт розміщення	$V_{\text{сер}}$ на рік, м/с	Потужність, Вт/м²
1	2	3	4
Карчі	Ла Лівертад	4,4	35,6
	Ел Ангел	4,7	42,4
	Гарсія Морено	5,1	57,3
		5,5	71,0
	Круз	6,9	147,0
	Лос Андес	6,6	127,4
Імвавура	Пімампіро	4,5	43,1
	Юракруз	5,5	70,7
Пічінча	Олмедо	4,3	34,4
	Монхас Алто	5,6	73,4
	Кангауа	5,6	77,7
		7,3	167,6
	Піфо	5,1	54,9
		4,3	33,4
		4,3	35,3
	Пінтаг	4,3	34,0
Порвенір	5,5	65,8	
Котопаксі	Тіксан	5,5	65,8

1	2	3	4
	Зумвагуа	5,2	55,2
	Тігуа	5,2	56,0
	Гуангахе	5,6	71,2
	Гуінгопана	5,5	64,9
Азуаї	Онія	5,5	71,7
	Пурін	5,3	65,1
	Лас Ніевес	4,5	39,8
	Навон	4,4	38,0

На рис.2.3. наведено розташування районів можливого встановлення вітроелектроустановок на території країни:

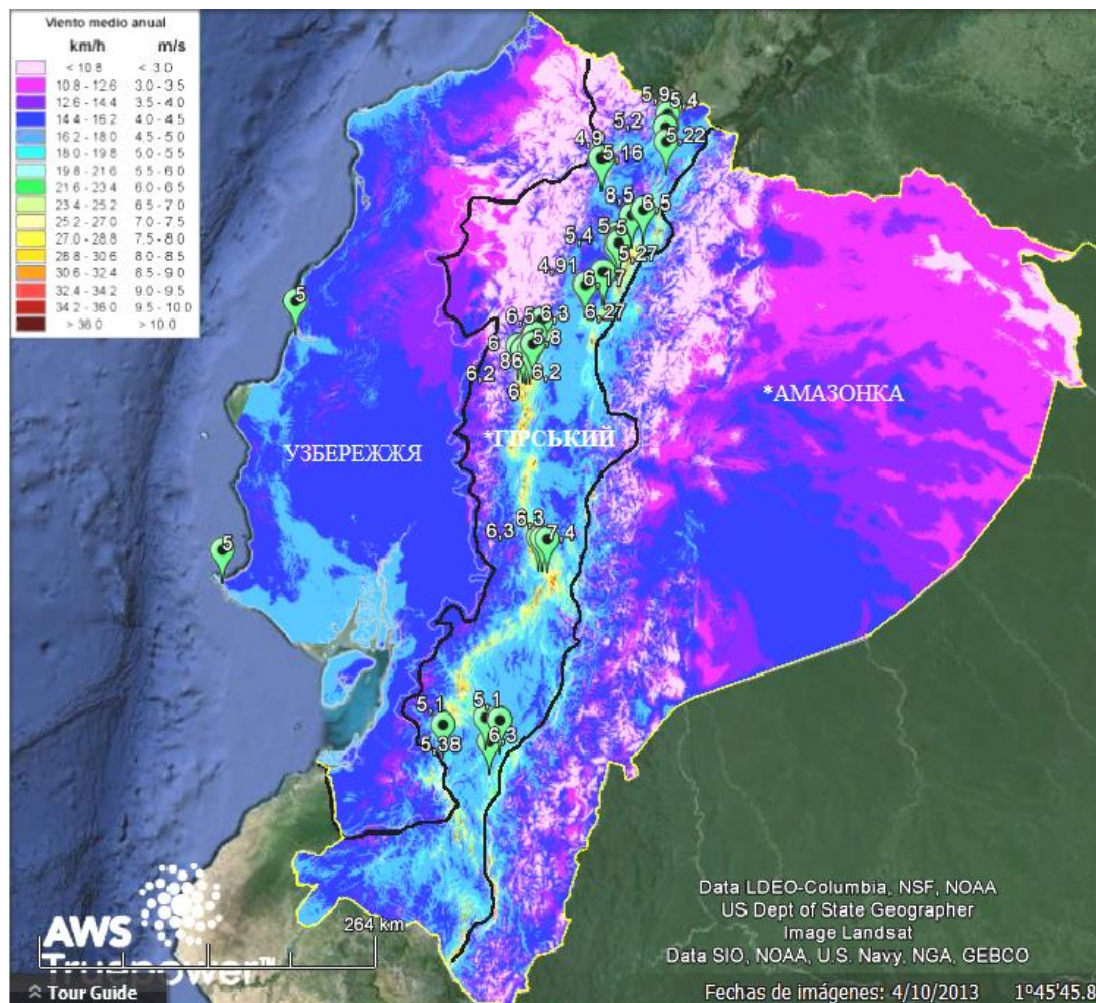


Рис. 2.3. Розташування районів можливого встановлення вітроелектроустановок

За результатами оцінки вітропотенціалу, можна зробити висновок, що найбільш перспективні пункти для встановлення ВЕУ знаходяться в гірських районах. Сила потоку тут формується під впливом висоти поверхні розташування, сонячної радіації, що змінюється протягом дня, географічних характеристик самої зони.

2.2. Обґрунтування конструкційної схеми автономної вітроелектроустановки з асинхронним генератором

Для роботи автономної ВЕУ можуть бути використані різні схеми конструкцій. Як правило, автономні системи будуються наступних блоків: ротор вітроустановки, електрогенератор, накопичувач електроенергії, перетворювач частоти постійного струму в змінний струм (рис.2.4).

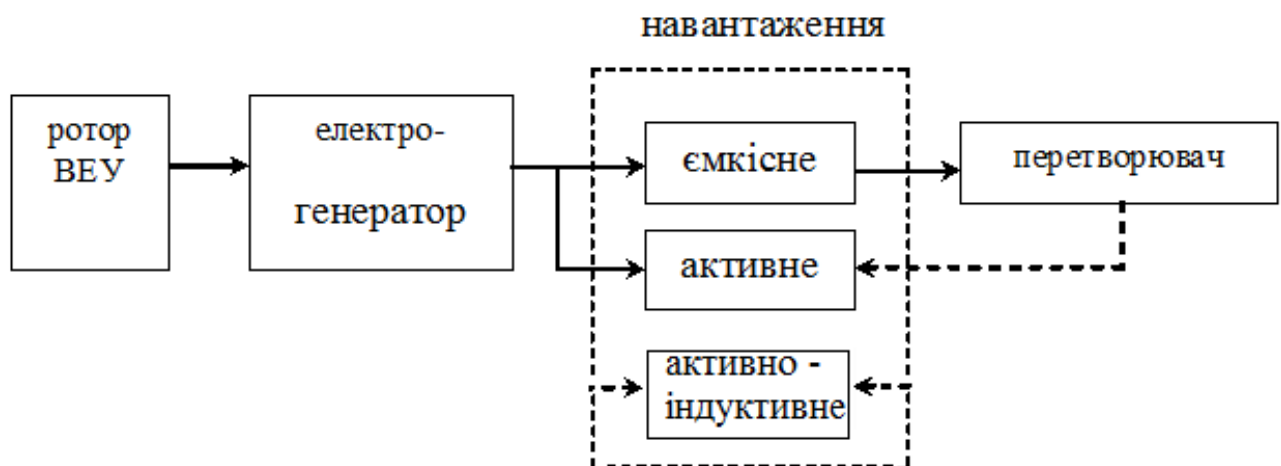


Рис. 2.4. Блок-схема конструкції ВЕУ.

Схеми системи ВЕУ з АГ мають передбачати безперервну подачу електроенергії для споживача протягом усього терміну експлуатації. Для автономних ВЕУ вимоги та прийняті технічні характеристики за структурою ВЕУ можуть істотно відрізнятись від тих, які повинні працювати паралельно з енергосистемою. Це пояснюється тим, що в даному випадку необхідні стандартні значення напруги та частоти джерела енергії не задаються енергосистемою, а повинні бути забезпечені системами контролю або керуванням ВЕУ [55,56]. Аналіз показує, що на автономних ВЕУ можна отримати задану частоту джерела, залежно від: 1) стабілізації частоти, отриманої в генераторі ВЕУ; 2) з

перетворенням змінної частоти, отриманої в генераторі, в задану постійну частоту.

Для того щоб обрати найбільш доцільну систему ВЕУ треба врахувати, яку саме роботу вона буде виконувати, типи споживачів та вплив на неї. Залежно від цього можна обрати систему високонадійну, однак складну у використанні систему з регулюванням частоти та напруги, або не складну систему, але з обмеженням регулювання частоти та напруги.

2.2.1. Аналіз вибору схеми конструкції ВЕУ

Асинхронний генератор має ряд переваг, що полягають в простоті конструкції, високій надійності в експлуатації, нескладних схемах під'єднання для паралельної роботи з мережею та іншими джерелами електроенергії. Асинхронний генератор є механічно міцною машиною, яка потребує мінімального догляду. А у разі короткого замикання ударний струм швидко затухає, що не викликає перегрівання та руйнування обмоток. При перевантаженні генератор швидко втрачає збудження (і навіть розмагнічується), що також запобігає виходу його з ладу. Ще однією перевагою асинхронного генератора є те, що напруга на його виході має сталу частоту при зміні частоти обертів ротора в деяких межах, і це надає йому більшу стійкість при роботі в мережі, ніж при застосуванні синхронних машин [57,58].

До недоліків АГ відносять менший рівень вироблення енергії у порівнянні з синхронними машинами. Це пов'язано з меншим коефіцієнтом потужності, що у свою чергу, обумовлено більшими струмами намагнічування (вони пропорційні квадрату напруги). Крім того, робота асинхронного генератора як автономного джерела живлення можлива тільки при умові подачі в обмотку статора реактивної потужності від батареї конденсаторів, що під'єднані до кожної фази. При активному навантаженні реактивна потужність, що надходить від конденсаторів, повинна дорівнювати реактивній потужності генератора (за величиною необхідної для створення магнітного потоку). При активно-індуктивному навантаженні реактивна потужність від конденсаторів повинна

покривати також реактивну потужність навантаження. Така величина ємності конденсаторів значно здорожчує вартість вітроустановки, що є недоліком.

Автономна вітроенергетична система в залежності від її компоновки може створювати структурні схеми, що працюють окремо або паралельно на споживача. Розглянемо варіанти структурних схем, що утворюються від різного набору компонентів (рис.2.5) [59].

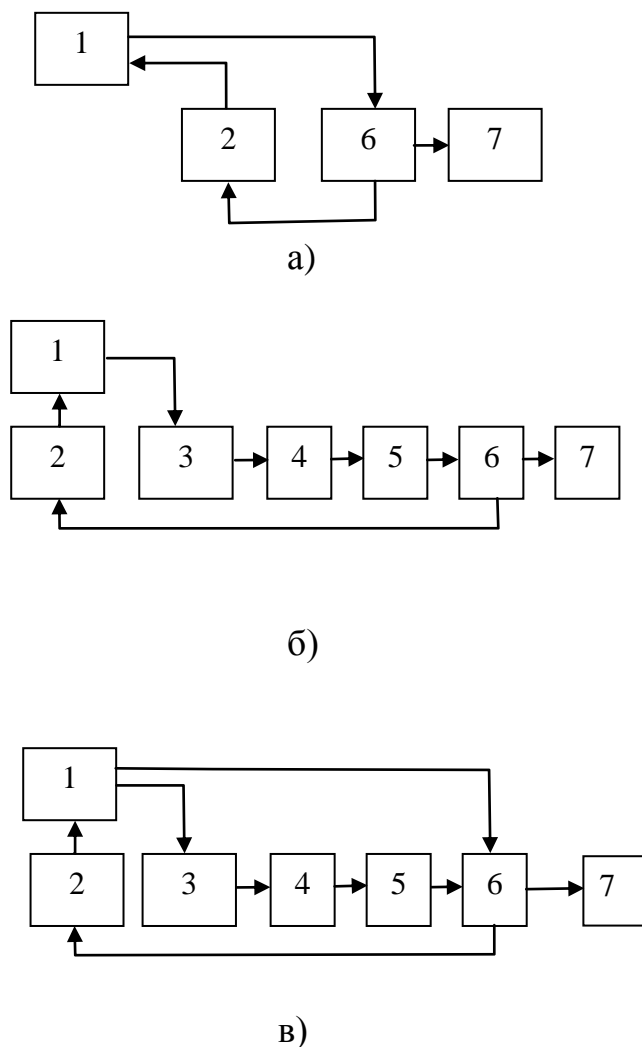
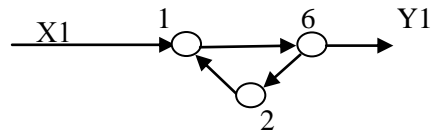
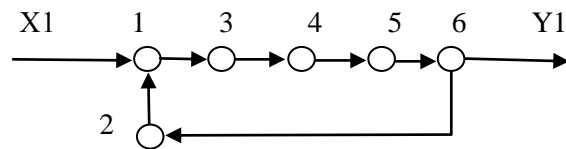


Рис. 2.5. Варіанти структурних схем автономної вітроенергетичної системи з асинхронним генератором: 1 – вітроелектроустановка; 2 – конденсаторна батарея; 3 – контролер; 4 – акумуляторний блок; 5 – інвертор; 6 – синхронізатор; 7 – споживач.

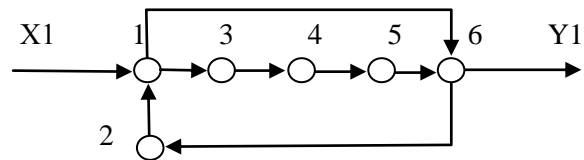
За допомогою орієнтовних графів розглянемо алгоритм функціонування даної системи, як сукупність залежностей, що визначає необхідне виконання заданого процесу забезпечення енергією споживача (рис.2.6).



а)



б)



в)

Рис. 2.6. Графи до варіантів побудови автономної вітроенергетичної системи з асинхронним генератором.

Вузлами графа є структурні складові системи; ребра – потоки енергії між вузлами; $X1$ – потік надходження енергії вітру; $Y1$ – потік потреб енергії до споживача.

У даних схемах головного зворотнього зв'язку принципово не може бути, оскільки надходження вітру не може бути керованим. Можливе обмеження виробітку електроенергії у разі відсутності споживача або акумулюючих систем.

Перетворення потоків енергії в системі при забезпеченні потреб споживача проходить:

– за схемою а):

$$X1 \rightarrow k_1 X1 \text{ за умови } X1 > Y1;$$

$$Y1 \rightarrow 0 \text{ за умови } X1 \rightarrow 0.$$

Здійснюється корекція за величиною реактивної потужності при змінах $X1$ та $Y1$ як окремо, так і сумісно.

– за схемою б):

$X1 \rightarrow k_1 k_3 k_4 k_5 X1$ за умови $X1 > Y1$.

У випадку $X1 \rightarrow 0$ забезпечення споживача проходить за рахунок накопиченої енергії у вузлі 4 за умови, що $k_4 k_5 X1 > Y1$. Здійснення, за необхідністю, корекції величини реактивної потужності в системі проводить вузол 6.

– за схемою *в*:

$X1 \rightarrow k_1 X1$ за умови $X1 > Y1$;

$X1 \rightarrow k_4 k_5 X1$ за умови $Y1 > X1$ або $X1 \rightarrow 0$.

Забезпечення споживача проходить за двома взаємопов'язаними каналами. Перший – є варіантом схеми *а*. Другий – є варіантом схеми *б*. За величини $X1 >> Y1$ йде забезпечення споживача та зарядження акумуляторного блоку. За величини $Y1 > X1$ забезпечення проходить за рахунок накопиченої енергії акумулятором. Вибір каналів, а також глибини корекції проводиться через вузол синхронізації 6.

k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 – коефіцієнти узгодження вузлів графа, відповідно вітроенергоустановки, блоку конденсаторів, контролера, акумулятору цього блоку, інвертора, кожний з яких менше 1.

В енергетичному плані найменші втрати має схема *а*, так як складається з найменшої кількості вузлів. Вона може бути застосована для споживачів, що не висувають жорстких технологічних вимог за часом енергозабезпечення. Надійність енергозабезпечення, в даному випадку, залежить від ймовірнісних показників надходження енергії вітру за величинами робочої швидкості вітроелектричних установок.

Схема *б* зменшує залежність енергозабезпечення від коливань надходження енергії вітру в часі. В даному випадку необхідне енергоузгодження вузлів, тобто кількості енергії, що надходить, кількості енергії, що акумулюється, і кількості енергії, що споживається. При порушенні такої рівноваги необхідно передбачити баластні пристрої при умові, що надходження енергії вітру більше, ніж споживання або автоматичні засоби, що обмежують потужність споживача.

Схема *в* є комбінацією попередніх двох з метою підвищення ефективності перетворення енергії вітру. В цьому випадку перетворення енергії вітру спочатку йде через вузли 3–6, а при повному зарядженні акумуляторного блоку і високому надходженні *XI* проводиться пряме енергозабезпечення споживача.

Дві останні схеми мають в декілька разів більше вузлів, ніж схема *а*, що зменшує сумарну величину перетворення енергії вітру, але мають можливість підвищити коефіцієнт заповнення графіка навантаження споживача практично до 1.

Технологічні процеси споживача за енерговимогами в системі «джерело–споживач» за часом енергозабезпечення можуть бути:

- із жорстко заданою виробничою програмою, що передбачає рівномірне завантаження протягом доби (без або з сезонними коливаннями);
- із жорстко заданою виробничою програмою, що передбачає нерівномірне завантаження протягом доби (без або з сезонними коливаннями).

Крім того, характер навантаження може бути активним або активно-індуктивним, що вимагає регулювання компенсації реактивної потужності.

Складова «джерело» складається із блоку вітроелектричної установки, готовність якої до виробництва електроенергії визначається вітрорежимним характером місцевості, що має випадковий характер. Звідси впливає вимога до створення буферного блоку у вигляді акумуляуючої системи, що заряджається перед тим, як система буде під'єднана до споживача. В такому випадку утворюються два канали енергозабезпечення.

Складова «споживач» висуває вимоги до електрозабезпечення згідно з своєї категорії за надійністю енергопостачання. Таким чином, система енергозабезпечення споживача повинна бути упорядкованою, тобто енергоживлення проводиться від акумуляуючої системи, а вітроелектроустановка проводить постійне підзаряджування її. У випадку, коли є надлишок надходження енергії вітру, вітроустановка під'єднується напряму до споживача, а акумуляуюча система працює в режимі стабілізації параметрів мережі при незначних коливаннях швидкості вітру.

Проаналізуємо задачу енергозабезпечення споживача від даних систем за допомогою положень теорії масового обслуговування. Отже, хай потік вимог споживача є стаціонарним, ординарним і не має наслідків, але сама система не зможе виконати всі потреби споживача, тобто буде системою з відмовами. Граф можливих станів системи матиме вигляд:

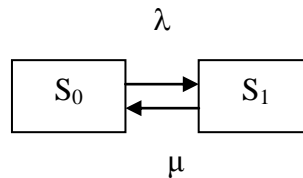


Рис. 2.7. Граф стану системи.

де λ – інтенсивність потоку попиту споживача (заявок),

μ – інтенсивність потоку надходження енергії вітру (обслуговування),

S_0 – стан, коли система не може обслуговувати споживача,

S_1 – стан коли система обслуговує споживача.

Відносна пропускна здатність Q системи для одно каналної системи складає:

$$Q = \frac{\mu}{\lambda + \mu}. \quad (2.4)$$

Якщо необхідно забезпечити рівень обслуговування потреб споживача не менше 80%, то інтенсивність навантаження λ/μ не повинна перевищувати 0,25, тобто інтенсивність потоку обслуговування повинна бути в чотири рази більшою інтенсивності потоку заявок. При крутоспадаючій електромеханічній характеристиці асинхронного генератора це вимагає використання завищеної встановленої потужності.

Організація двоканальної системи дозволить дещо підвищити ступінь забезпеченості споживача. Якщо скористатись рівнянням Ерланга стосовно двоканальної системи з відмовами:

$$Q = 1 - \frac{\rho^2}{2!} \frac{1}{\left(1 + \rho + \frac{\rho^2}{2}\right)}, \quad (2.5)$$

то отримаємо наступний результат: при $Q=80\%$ $\rho = \frac{\lambda}{\mu} = 1$, тобто інтенсивність потоку обслуговування і заявок зрівнюється.

На рис. 2.8. наведена залежність $\frac{\lambda}{\mu} = f(Q)$ для одно- та двоканальної систем. Останні мають перевагу перед першими, так як пристрої виконання заявок працюють з меншою інтенсивністю.

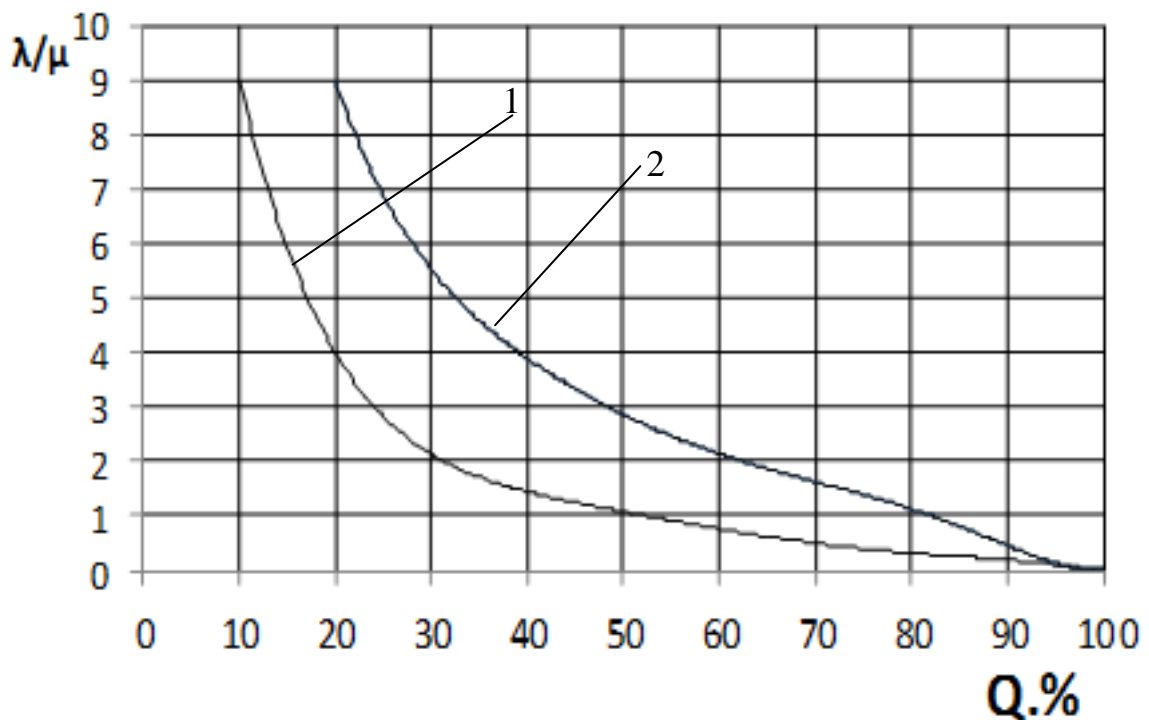


Рис. 2.8. Залежність інтенсивності навантаження від пропускної здатності одно (1) та двоканальної (2) системи.

Таким чином, при розробці автономної вітроелектричної системи на базі асинхронного генератора необхідно орієнтуватися на схеми, що мають можливість підвищити коефіцієнт заповнення графіка навантаження.

2.3. Математична модель автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором.

Автономна система з ВЕУ складається з трьох елементів: 1 – вітряна турбіна, 2 – електричний генератор та 3 – навантаження (рис. 2.9).

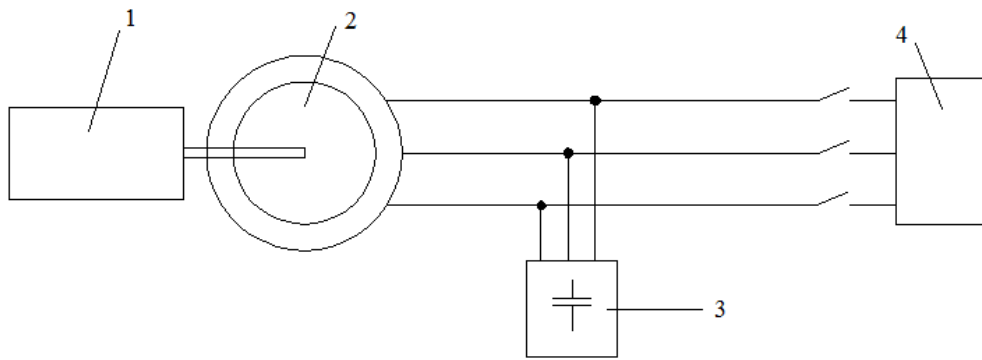


Рис. 2.9. Автономна системи з ВЕУ з АГ з самозбудженням

Передаточні функції ланок визначаються із рівнянь, які описують їх рух, при цьому враховується, що зміна параметрів ланок носить нелінійний характер [60-62]:

$$j \frac{d\omega}{dt} = M_i - M_{i+1}, \quad (2.6)$$

де M_i – механічний момент першої ланки (момент на валу ротора вітроелектроустановки);

M_{i+1} – момент наступної ланки (електромагнітний момент на валу ротора генератора);

j – приведений момент інерції обертювих елементів ротора;

ω – кутова швидкість обертання ротора та генератора.

Після лінеаризації робочої частини характеристики ланок отримано рівняння, що має наступний вигляд [60,63]:

$$j \frac{\omega_0}{M_0} \frac{d\omega}{dt} + \varphi \frac{\omega_0}{M_0} \left\{ \left(\frac{dM_i}{d\omega} \right)_0 - \left(\frac{dM_{i+1}}{d\omega} \right)_0 \right\} = \mu, \quad (2.7)$$

де $\mu = \frac{\Delta M}{M_0}$ та $\varphi = \frac{\Delta \omega}{\omega_0}$.

Дане рівняння описує аперіодичну ланку першого порядку:

$$W_i(p) = \frac{1}{T_i p + \xi_i}, \quad (2.8)$$

де $T_i = \left(J \frac{\omega_0}{M_0} \right)_i$ – стала часу ланки,

$$\xi_i = \left\{ \left(\frac{dM_i}{d\omega} \right)_0 - \left(\frac{dM_{i+1}}{d\omega} \right)_0 \right\} \frac{\omega}{M_0} - \text{коефієнти самовирівнювання.}$$

Система являє собою енергоканал «вітроагрегат – асинхронний генератор – споживач», який можна показати як послідовне з'єднання трьох ланок (рис. 2.10).

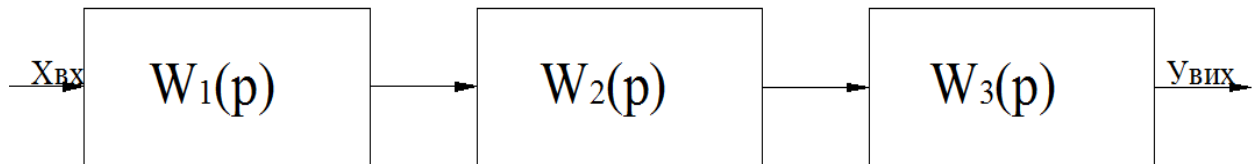


Рис. 2.10. З'єднання динамічних ланок системи: $W_1(p)$ – передаточна функція ланки, що описує віротурбіну; $W_2(p)$ – передаточна функція ланки, що описує генератор; $W_3(p)$ – передаточна функція ланки, що описує споживача.

Загальна передаточна функція $W(p)$ визначається наступним чином:

$$W(p) = W_1(p)W_2(p)W_3(p), \quad (2.9)$$

$$W(p) = \frac{1}{T_1p + \xi_1} \cdot \frac{1}{T_2p + \xi_2} \cdot \frac{1}{T_3p + \xi_3}. \quad (2.10)$$

Тоді характеристичне рівняння складе:

$$(T_1p + \xi_1)(T_2p + \xi_2)(T_3p + \xi_3) = 0, \quad (2.11)$$

$$(T_1T_2T_3)p^3 + (T_2T_3\xi_1 + T_1T_3\xi_2 + T_1T_2\xi_3)p^2 + (T_1\xi_2\xi_3 + T_2\xi_1\xi_3)p + \xi_1\xi_2\xi_3 = 0.$$

Або буде мати наступний вигляд:

$$a_0p^3 + a_1p^2 + a_2p + a_3 = 0, \quad (2.12)$$

де $a_0 = T_1T_2T_3$,

$$a_1 = T_1T_3\xi_2 + T_2T_3\xi_1 + T_1T_2\xi_3,$$

$$a_2 = T_1\xi_2\xi_3 + T_2\xi_1\xi_3 + T_3\xi_1\xi_2,$$

$$a_3 = \xi_1\xi_2\xi_3.$$

Аналіз параметрів, що впливають на режим роботи системи ВЕУ, проведено за допомогою критерію Гурвиця [64] умовами стійкості, за яким є необхідність та достатність всіх діагональних мінорів визначника, що складається з коефіцієнтів характеристичного рівняння, бути більше нуля, тобто співпадати за знаком з першим коефіцієнтом даного рівняння: $a_0 > 0$, $\Delta_1 = a_1 > 0$, $\Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$, $a_3 > 0$.

Тоді умовами стійкості системи «вітроагрегат – асинхронний генератор – споживач» будуть наступні:

$$T_1 T_2 T_3 > 0,$$

$$T_1 T_3 \xi_2 + T_2 T_3 \xi_1 + T_1 T_2 \xi_3 > 0,$$

$$(T_1 T_3 \xi_2 + T_2 T_3 \xi_1 + T_1 T_2 \xi_3) \cdot (T_1 \xi_2 \xi_3 + T_2 \xi_1 \xi_3 + T_3 \xi_1 \xi_2) - (T_1 T_2 T_3) \cdot (\xi_1 \xi_2 \xi_3) > 0,$$

$$\xi_1 \xi_2 \xi_3 > 0.$$

2.4. Аналіз процесів стабілізації роботи автономної ВЕУ з асинхронним генератором

Аналіз проведено для випадку, коли навантаження є активним.

Перша умова $\Delta_0 = a_0 > 0$:

– коефіцієнт $T_1 T_2 T_3 > 0$, множення показників сталих часу повинно бути більше нуля. Тривалість сталої часу повинно бути більшою за попередню, $T_1 < T_2 < T_3$, тобто необхідне послідовне набирання всталеного значення моментів складових системи.

Друга умова $\Delta_1 = a_1 > 0$, коефіцієнт $a_1 = T_2 T_3 \xi_1 + T_1 T_3 \xi_2 + T_1 T_2 \xi_3 > 0$:

– аналіз першої складової показує, щоб $\xi_1 > 0$, швидкість наростання моменту на валу ротора вітроагрегата повинна бути більшою за швидкість наростання моменту на валу ротора асинхронного генератора;

– для другої складової ($T_1 T_3 \xi_2 > 0$) необхідно, щоб швидкість наростання моменту на валу ротора асинхронного генератора повинна бути більшою ніж швидкість наростання електромагнітного моменту, що створює навантаження;

– для третьої складової ($T_1 T_2 \xi_3 > 0$) необхідно, щоб зміна навантаження не перевищувала заданого (номінального) значення.

При виникненні режиму, коли $\xi_1 > 0$, а ξ_2 і $\xi_3 < 0$, але $\xi_1 > \xi_2 + \xi_3$, необхідна зупинка вітроелектроустановки, оскільки це свідчить про те, що електрогенератор працює не в заданому (аварійному) режимі.

Третя умова $\Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$:

- умова стійкості коефіцієнта a_1 розглянуті вище;
- стійкість системи буде забезпечена при одночасному виконанні наступних умов, коли ξ_2 і $\xi_3 > 0$, ξ_1 і $\xi_3 > 0$, ξ_2 і $\xi_1 > 0$, тобто різниці швидкості наростання моменту на роторі генератора і навантаження співпадають за знаком;
- a_3 буде більше нуля в тому випадку, коли швидкість наростання моменту на кожній ланці більше нуля.

Запас стійкості буде характеризуватися вільним членом характеристичного рівняння, який залежить тільки від динамічних властивостей складових ланок, що свідчить про необхідність передбачати застосування буферних елементів. Так як в автономній ВЕУ з АГ завжди існує дефіцит реактивної енергії, то необхідно передбачити можливість здійснення її компенсації при наростанні навантаження або коливання рівня швидкості вітру.

Таким чином, дана модель дозволяє визначити чинники та їх поєднання, що впливають на стійкість системи. Чисельне значення їх доцільно провести на базі імітаційного моделювання режимів роботи автономної вітроелектроустановки.

2.5. Висновки за розділом

1. Аналіз вітроенергетичних ресурсів Екватору показує, що найбільш перспективні пункти для встановлення ВЕУ знаходяться в гірських районах, де середньорічна швидкість вітру коливається у межах від 4 м/с до 6 м/с.

2. При розробці конструкційних схем автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором, слід враховувати, що їх компоновка повинна орієнтуватися на двоканальні схеми, які забезпечують максимально

можливий коефіцієнт заповнення графіка навантаження споживача (практично до 1).

3. Розроблено математичну модель автономної вітроелектроустановки з асинхронним генератором та проведено її аналіз на базі критерію Гурвиця, що дозволив встановити характер протікання динамічних процесів, які впливають на режими роботи та стійкість системи за зміни швидкості вітру.

РОЗДІЛ 3

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ З АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ

3.1. Розробка загальної схеми імітаційної моделі

Імітаційна модель для дослідження режимів роботи автономної вітроелектричної системи з АГ, дозволяє спостерігати та аналізувати характеристики швидкості ротора, електромагнітного моменту, механічного моменту, зміни напруги та струму при зміні навантаження та надходження швидкості вітру.

Імітаційна модель складається з наступних блоків: вітряної турбіни, АГ, батареї конденсаторів (C) та активного навантаження (R). Турбіна приєднана до валу асинхронного генератора. На відповідні термінали АГ приєднане трифазне активне навантаження. Розташування елементів системи наведено на рис.3.1.

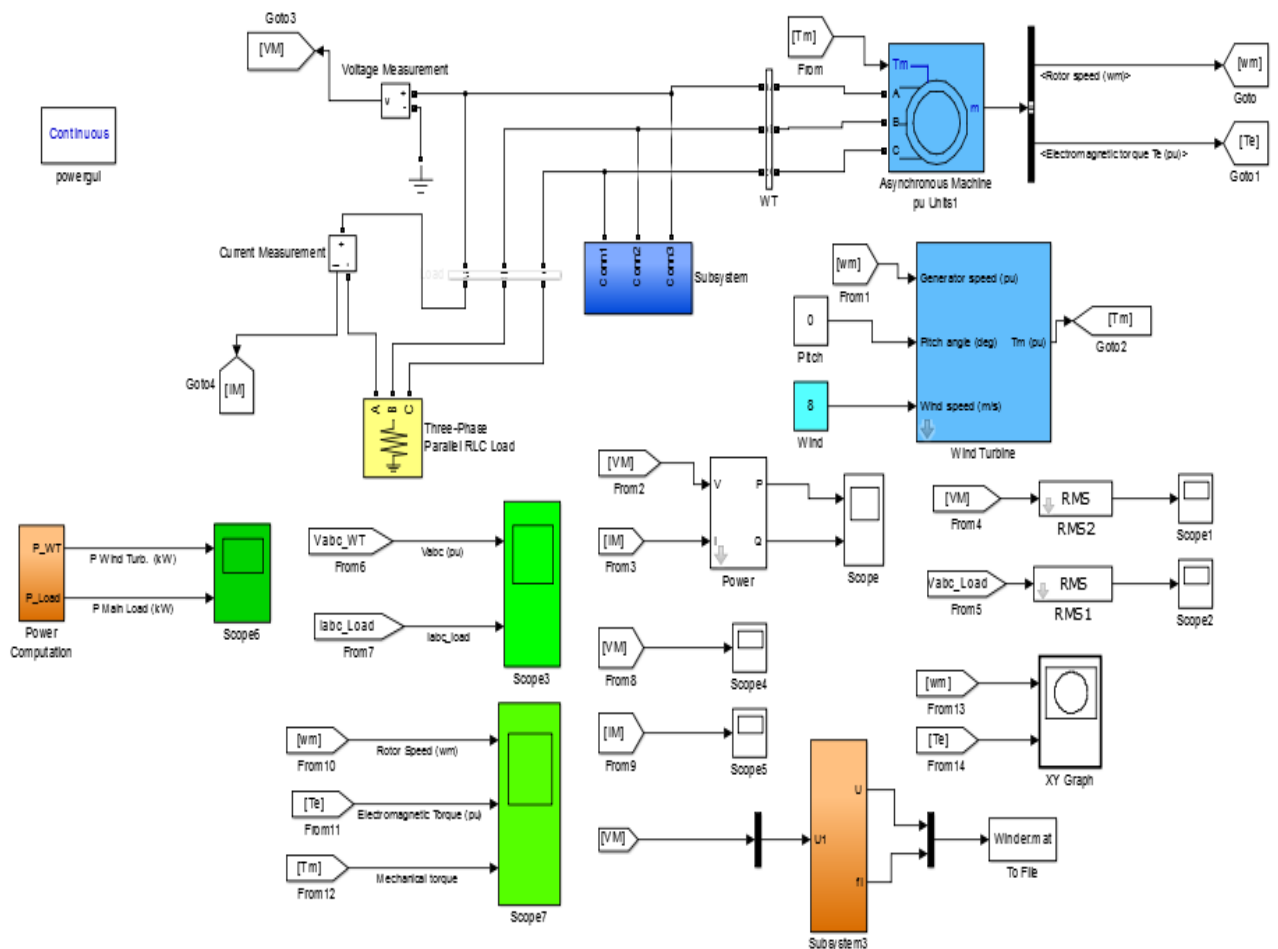


Рис. 3.1. Базова схема автономної ВЕУ.

Важливим компонентом моделі є вітротурбіна, потужність якої визначається як [65-69]:

$$P_m = c_p(\lambda, \beta) \frac{\rho \cdot A}{2} v_{wind}^3. \quad (3.1)$$

Формула (3.1) може бути подана в відносних одиницях:

$$P_{m(в.о)} = k_p \cdot c_{p(в.о)} \cdot v_{wind(в.о)}^3, \quad (3.2)$$

де P_m – номінальна потужність для визначених значень (ρ, A) ;

k_p – коефіцієнт підсилення для $c_{p(в.о)} = 1$ та $v_{wind(в.о)}^3 = 1$;

c_p – коефіцієнт потужності;

A – площа обмаху ротора, м²;

ρ – густина повітря, кг/м³.

Модуль швидкохідність λ , приймається як:

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v}, \quad (3.3)$$

де Ω – кутова швидкість, рад/с;

R – довжина лопаті, м;

v – швидкість вітру, м/с.

Коефіцієнт потужності визначений як [66]:

$$c_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda}} + c_6 \lambda, \quad (3.4)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right). \quad (3.5)$$

Коефіцієнти від c_1 до c_6 : $c_1 = 0.5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$, $c_6 = 0.0068$. Коефіцієнт c_p приймає наступні значення [70]: максимальне значення дорівнює 0.48, при $\beta = 0$ та модулі $\lambda = 8$ [65]. При номінальній швидкості вітру 8 м/с асинхронний генератор збуджується, досягає и генерує номінальну напругу при номінальній частоті (рис. 3.2).

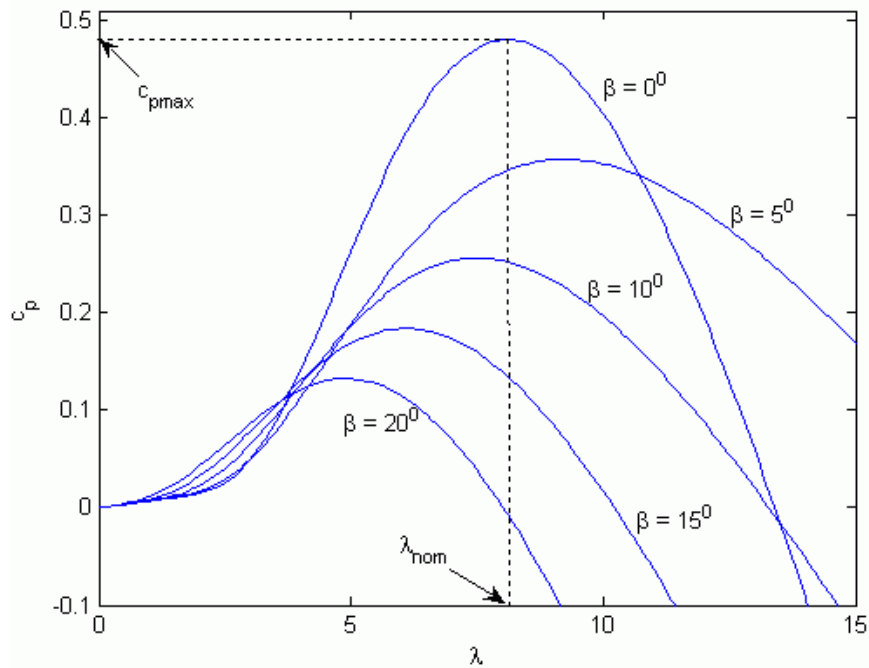


Рис. 3.2. Залежності коефіцієнта потужності (коефіцієнта використання енергії вітру) від швидкохідності

Параметри, за яких досягається максимальна потужність за умови базової (максимальної швидкості) швидкості вітру з номінальним мехнічним моментом у відносних одиницях та базової (номінальної) частоті обертання у відносних одиницях наведені на рис. 3.3 [65, 71-73].

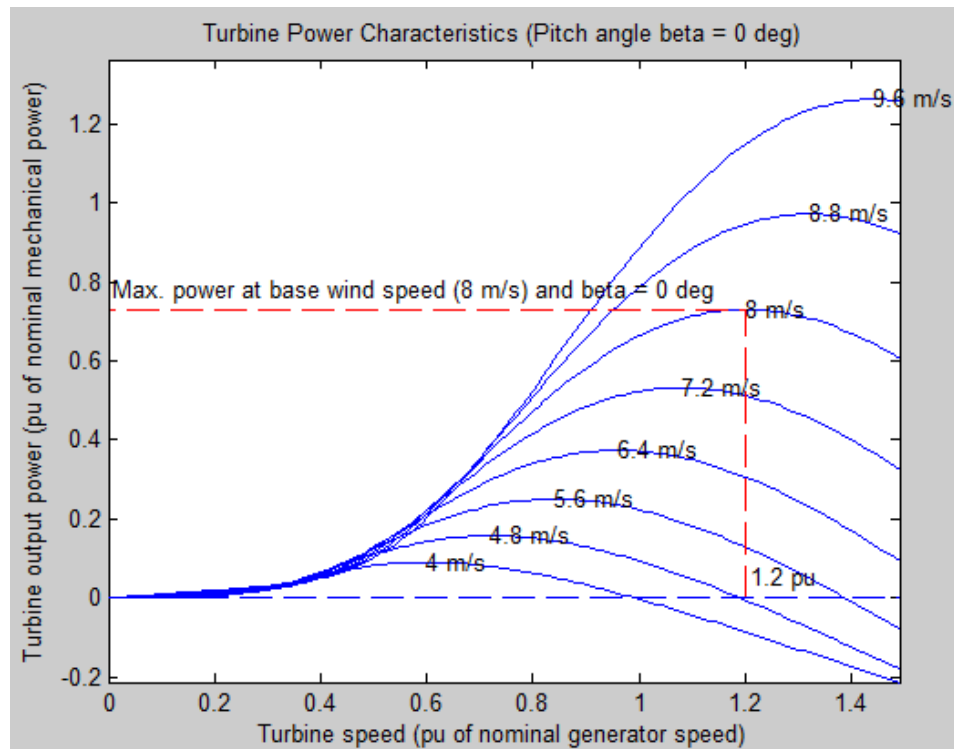


Рис. 3.3. Характеристики потужності вітротурбіни

Складовими блоками конструкційної схеми імітаційної моделі вітроелектричної установки з асинхронним генератором є: блок вітряної турбіни, де вхідними параметрами є швидкість ротора (ω_m), кут нахилу лопаті (коли використовується максимум – дорівнює нулю), та миттєва швидкість вітру 8 м/с. В блок «вітряна турбіна» введені параметри: номінальна механічна потужність на виході 4000 Вт, потужність генератора 4000 Вт, базова швидкість вітру 8 м/с, максимальна потужність 0.73 при базовій (номінальній) швидкості вітру, базова швидкість ротора 1.2 (від базової швидкості генератора у відносних одиницях). Вхідним параметром моделі вітряної турбіни є механічний момент (у відносних одиницях). Блок асинхронного генератора з короткозамкненою обмоткою ротора, де вхідними параметрами, що входять до нього є механічний момент вітряної турбіни приведений до валу асинхронного генератора.

Для роботи в автономному режимі в асинхронний генератор необхідне подання реактивної енергії до обмотки статора для самозбудження. Для цього використаний блок конденсаторів, в даному випадку 21 мкФ на фазу.

Конфігурація блока дозволяє провести вибір типу асинхронної машини: тип ротора (з короткозамкненою обмоткою).

В блок асинхронного генератора введені наступні параметри: номінальна потужність 4000 (ВА), діюча лінійна напруга 380 (В), частота (50 Гц) [$P_n(VA)$, $V_n(V_{rms})$, $f_n(Hz)$]; опір 0.03513 та індуктивність статора 0.04586 [R_s , L_s (у відносних одиницях)]; опір 0.03488 та індуктивність ротора 0.04586 [R_r , L_r (у відносних одиницях)]; взаємна індуктивність 1.352 [L_m (у відносних одиницях)]; момент інерції 0.0404, коефіцієнт тертя 0.01842, кількість пар полюсів 2 [J , F ($H \cdot m^2 \cdot s$) у відносних одиницях, p]; початкові умови [$s_{th} (deg)$ i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} (А) ϕ_{hA} , ϕ_{hB} , $\phi_{hC} (deg)$]. Параметри початкових умов задаються у вигляді вектора, кожен елемент якого має наступні значення: -8.89496e-048 s – ковзання; 0 th – фаза; 0.280896 i_{sa} , 0.280896 i_{sb} , 0.280896 i_{sc} – початкові значення струмів статора (А); -89.7425 ϕ_{hA} , 150.258 ϕ_{hB} , 30.2575 ϕ_{hC} – початкові фази струмів статора (град.).

Вхідний сигнал T_m призначений для подачі механічного моменту, тобто вал АГ приводиться до валу БЕУ. T_m позитивний – машина працює як двигун й T_m

негативний – машина працює як генератор. Математична модель асинхронної машини з к.з. обмоткою ротора подана в координатах (d-q) наступними рівняннями [74-82]:

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega \varphi_{ds}, \quad (3.6)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega \varphi_{qs}, \quad (3.7)$$

$$V_{qr}' = R_r i_{qr}' + \frac{d\varphi_{qr}'}{dt} + (\omega - \omega_r) \varphi_{dr}', \quad (3.8)$$

$$V_{dr}' = R_r i_{dr}' + \frac{d\varphi_{dr}'}{dt} - (\omega - \omega_r) \varphi_{qr}', \quad (3.9)$$

де R_s, R_r – активний опір статора та ротора;

V_{qs}, i_{qs} – проекція напруги та струму статора на вісь q;

V_{ds}, i_{ds} – проекція напруги та струму статора на вісь d;

V_{qr}, i_{qr} – проекція напруги та струму ротора на вісь q;

V_{dr}, i_{dr} – проекція напруги та струму ротора на вісь d;

$\varphi_{qs}, \varphi_{ds}$ – проекція потокощеплення статора на вісі d та q;

$\varphi_{qr}, \varphi_{dr}$ – проекція потокощеплення ротора на вісі d та q;

ω_r – електрична кутова частота обертання ротора.

Рівняння потокощеплення:

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}', \quad (3.10)$$

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}', \quad (3.11)$$

$$\varphi_{qr}' = L_r i_{qr}' + L_m i_{qs}, \quad (3.12)$$

$$\varphi_{dr}' = L_r i_{dr}' + L_m i_{ds}, \quad (3.13)$$

де $L_s = L_{ls} + L_m$, – загальна індуктивність статора;

$L_r = L_{lr} + L_m$, – загальна індуктивність ротора;

L_m – індуктивність ланки намагнічування;

L_{ls} та L_{lr} – індуктивність розсіювання кожної фази.

Наступний вираз характеризує електромагнітний момент [84-86]:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \cdot \left(\frac{P}{2}\right) \cdot L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}), \quad (3.14)$$

де T_e – електромагнітний момент.

$$T_d = T_e + J \left(\frac{2}{p}\right) \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.15)$$

де T_d – вхідний момент на валу асинхронного генератора від вітряної турбіни;

J – момент інерції;

p – кількість полюсів.

Робота АГ в режимі автономної системи можлива за умови подання реактивної потужності для збудження АГ. Найчастіше для цього використовують блок конденсаторів. Конденсатори можуть бути під'єднані в зірку або трикутник. Коли застосовують з'єднання зіркою, напруга, що прикладається до кожного конденсатора, зменшується в $\sqrt{3}$ порівняно із значенням, коли вони з'єднанні трикутником. Тоді при з'єднанні в зірку реактивна потужність з кожного конденсатора дорівнює 1/3 реактивної потужності отриманої при з'єднанні в трикутник [54]. Блоки конденсаторів, що підключені паралельно до асинхронного генератора, з'єднанні в зірку.

Значення ємності конденсаторів повинне бути мінімальним і визначається в залежності від типу навантаження та параметрів електромашини. Аналіз проведених робіт із визначення ємності конденсаторів показує, що їх можна поділити як аналітичні та прямі експериментальні. Вони дозволяють визначати ємність конденсаторів (в мкФ) для самозбудження АГ з коротко замкнутим ротором [36,37,86-93].

Еквівалентна схема асинхронного генератора з самозбудженням з приєднаним навантаженням наведена на рис. 3.4. [94].

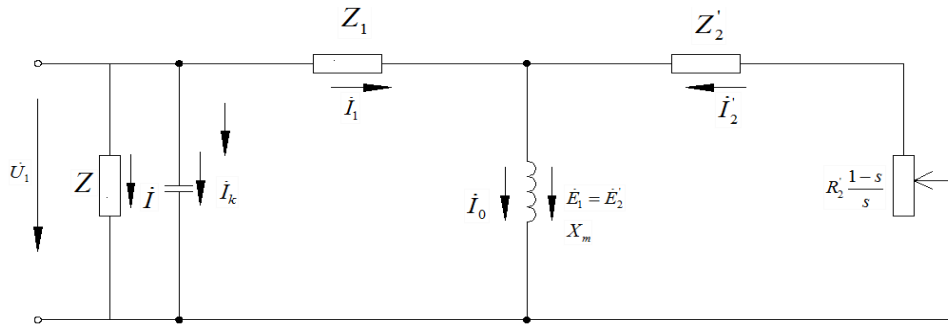


Рис. 3.4. Заступна схема АГ із навантаженням.

Зовнішній опір схеми АГ є навантаженням:

$$Z_n = r_n \pm jx_n, \quad (3.16)$$

де r_n – активне навантаження;

$\pm jx_n$ – індуктивне або ємкісне навантаження.

Опір конденсатора подається в наступному вигляді:

$$Z_c = -jX_c, \quad (3.17)$$

де числове значення X визначається як:

$$X_c = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}, \quad (3.18)$$

де C – ємність конденсатора.

За допомогою прямого методу, що розроблений Al Jabri [95] та [96,97], визначається мінімальне значення ємності конденсаторів з активно-індуктивним навантаженням (RL), без навантаження, активним навантаженням (R), індуктивним навантаженням (L). Перевага цього методу полягає в тому, що використовується не складний математичний розв'язок. Використаємо еквівалентну фазну схему, рис. 3.5.

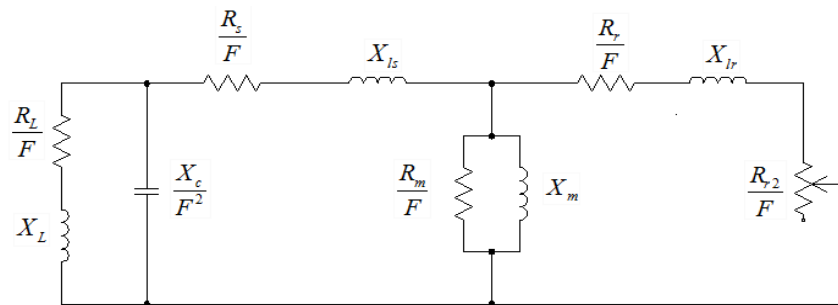


Рис. 3.5. Еквівалентна схема однієї фази асинхронного генератора з навантаженням.

Для знаходження C_{\min} – мінімальної ємності, при активно-індуктивному навантаженні (RL), загальний вираз буде поліномом четвертого порядку:

$$\alpha_4 F^4 - \alpha_3 F^3 + \alpha_2 F^2 - \alpha_1 F + \alpha_0 = 0, \quad (3.19)$$

де α_i – позитивні коефіцієнти.

Після розв'язання рівняння, отримаємо 2 реальних кореня. Вибирається їх максимальне значення – F_{\max} , яке підставляється у вираз для знаходження значення ємності.

У випадку, коли активне навантаження приєднується до системи АГ з короткозамкненим ротором, при якому індуктивне навантаження дорівнює $X=0$, формулу (3.18) можна подати наступними виразами:

$$X_c = -J_1 F \frac{F - vJ_2}{F^2 - vF - J_3}, \quad (3.20)$$

$$X_c = K_1 F \frac{F^2 - vF - K_2}{F^2 - vK_3}. \quad (3.21)$$

Щоб знайти мінімальну ємність C_{\min} для самозбудження, використовують наступну залежність:

$$C_{\min} = \left[2\pi f_b Z_b K_1 F_{\max} \frac{F_{\max}^2 - vF_{\max} - K_2}{F_{\max} - vK_3} \right]^{-1}, \quad (3.21)$$

де f – частота (Гц);

Z_b – повний опір схеми;

v – частота (у відносних одиницях).

Значення F_{\max} знаходять як:

$$F_{\max} = \frac{1}{2} \left\{ v + \sqrt{\left[v^2 - \frac{4R_s R_r}{X_{s\max}^2} \right]} \right\}. \quad (3.22)$$

Значення K_1, K_2, K_3 знаходять із виразів:

$$K_1 = \frac{R(X_{ls} + X_{s\max} \| X_{lr})}{R_r + R + R_s}, \quad (3.23)$$

$$K_2 = \frac{R_s + R_r}{(X_{smax} + X_{lr})(X_{ls} + X_{smax} \| X_{lr})}, \quad (3.24)$$

$$K_3 = \frac{R + R_s}{R_r + R + R_s}, \quad (3.25)$$

де R – опір навантаження;

Z_b – повний опір схеми.

Значення J_1, J_2, J_3 знаходять із виразів:

$$J_1 = \frac{R(R_r + R_s)}{X_{ls} + X_m \| X_{lr}}, \quad (3.26)$$

$$J_2 = \frac{R_s}{R_r + R_s}, \quad (3.27)$$

$$J_3 = \frac{R_r(R + R_s)}{(X_m + X_{lr})(X_{ls} + X_m \| X_{lr})}. \quad (3.28)$$

У випадку, коли визначають ємність конденсаторів прямим методом, використовуються паспортні дані машини. Даний метод не має високоматематичних вимог, проте він має практичне значення, коли відомі номінальні значення напруги, струму, коефіцієнта потужності та частоти.

При з'єднанні зіркою ємність конденсаторів складе [86,94]:

$$C = \frac{I \cdot \sin \varphi}{U \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}, \quad (3.29)$$

де I – струм конденсатора;

U – номінальна напруга;

$\omega = 2\pi f$ – частота.

Для вибору мінімальної ємності не слід вибирати максимальне значення x_c , оскільки система буде працювати в не стабільному режимі з коливанням напруги, що подається до споживача.

В імітаційній схемі автономної ВЕУ з асинхронним генератором, блок активного трифазного навантаження (споживач) приєднується паралельно і з'єднаний в зірку.

3.2. Розробка імітаційної моделі при змінній швидкості вітру

Розроблена імітаційна модель автономної ВЕУ з АГ слугує для дослідження роботи системи як в усталеному режимі, так і в перехідному процесі [98]. Модель дозволяє провести аналіз роботи системи при змінній швидкості вітру та виявити параметри, що необхідні для підтримання її стійкості (рис.3.6).

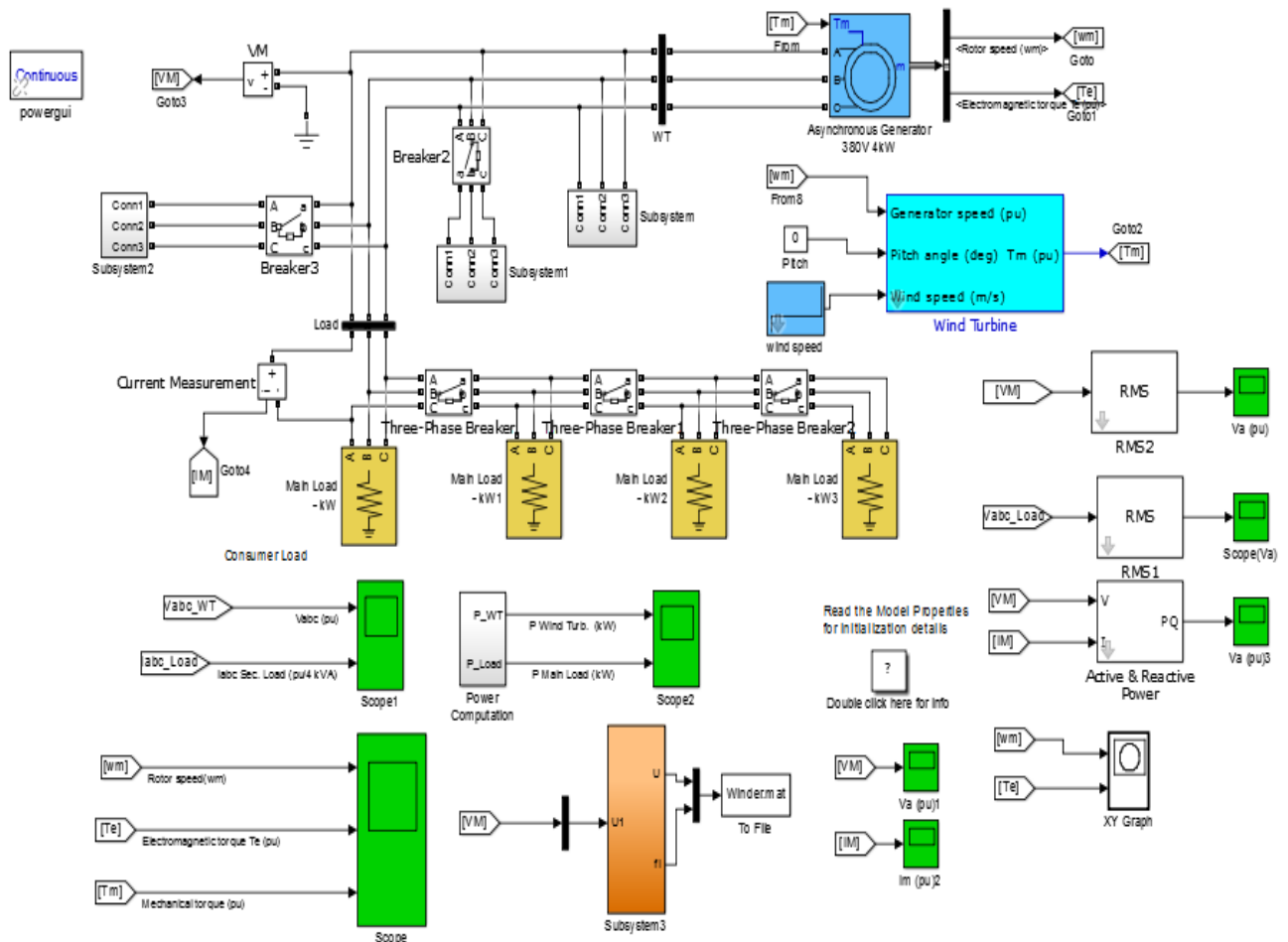


Рис. 3.6. Схема автономної ВЕУ з АГ при змінній швидкості вітру.

До моделі приєднаний блок, що імітує подачу різної швидкості вітру. Даний блок, дозволяє аналізувати поведінку системи під впливом зміни швидкості вітру. Крім цього, приєднується декілька ступеней активного навантаження з відповідною ємністю конденсаторів, які грають роль споживача. Ємність конденсатора дорівнює реактивній енергії, що потребує АГ щоб підтримати необхідні параметри на виході. У випадку, коли виникає змінна швидкість вітру, система повинна підтримувати стабільність постачання електроенергії до споживача.

3.3. Дослідження режимів роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором при змінній швидкості вітру

Системи АГ, коли працюють в усталеному режимі, мають наступні характеристики (рис 3.6), у додатках А та Б наведено додаткові характеристики АВЕУ з АГ.

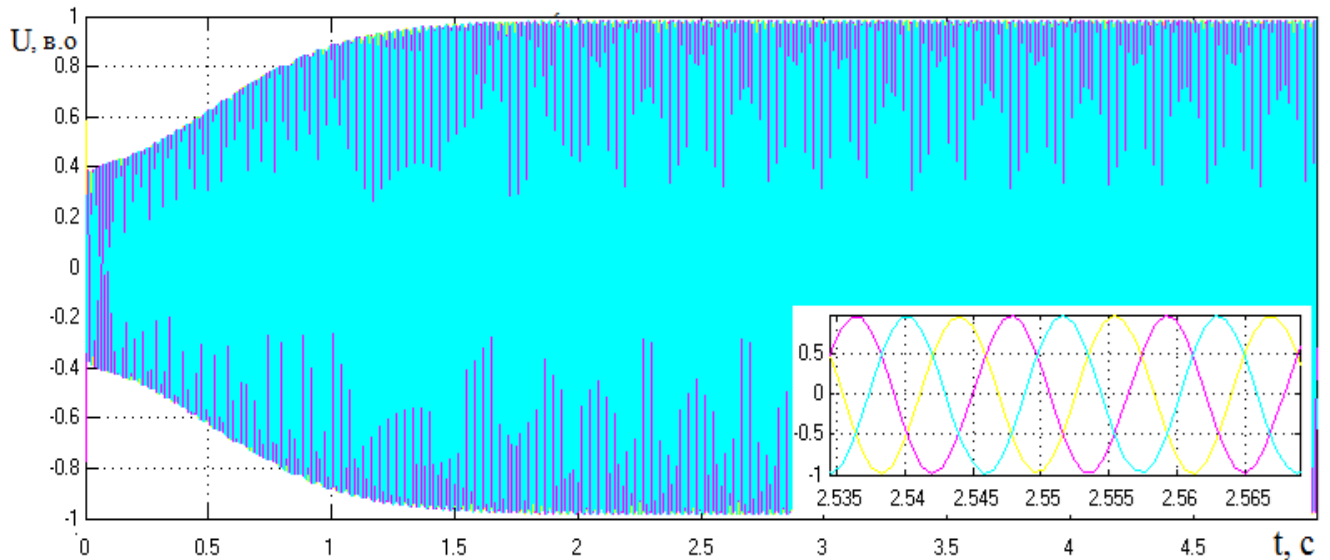


Рис. 3.7. Напруга, що отримується на виході ВЕУ.

На рис. 3.7 можна спостерігати за зміною напруги, що досягає номіналу у відносних одиницях при струмі навантаження біля 2 А (амперів).

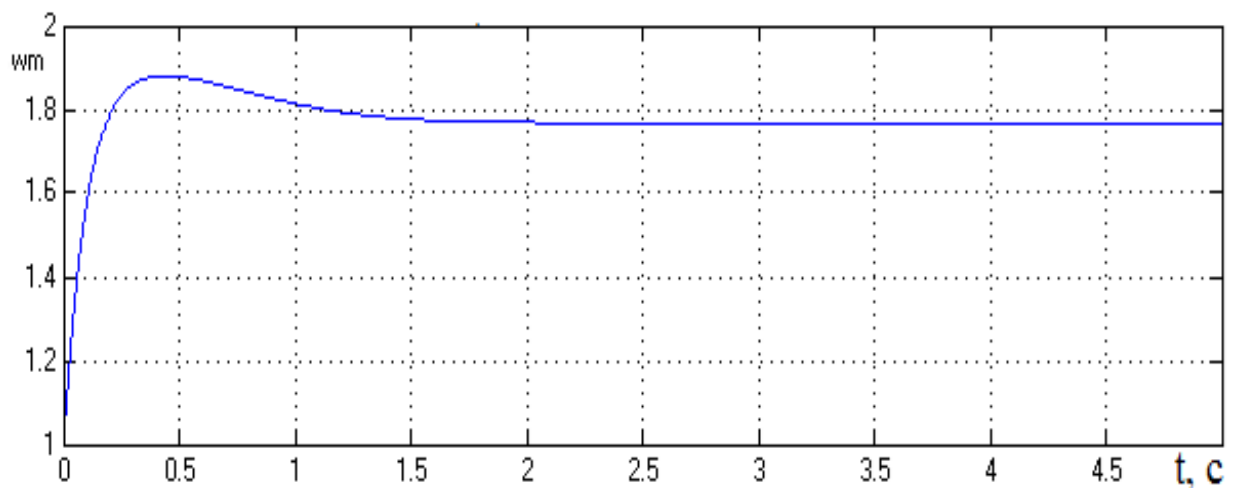


Рис. 3.8. Частота ротора, що отримується на виході ВЕУ.

З рис.3.8 слідує, що частота ротора досягає усталеного значення на $t=1.5$ с, при навантаженні $R=1$ кВт та при ємності компенсаційних конденсаторів $C=21,5$ мкФ на фазу.

Характеристики при змінному навантаженні, що приєднується поступово (з проміжком часу приєднання 2 с та 3 с), наведені на рис.3.9.

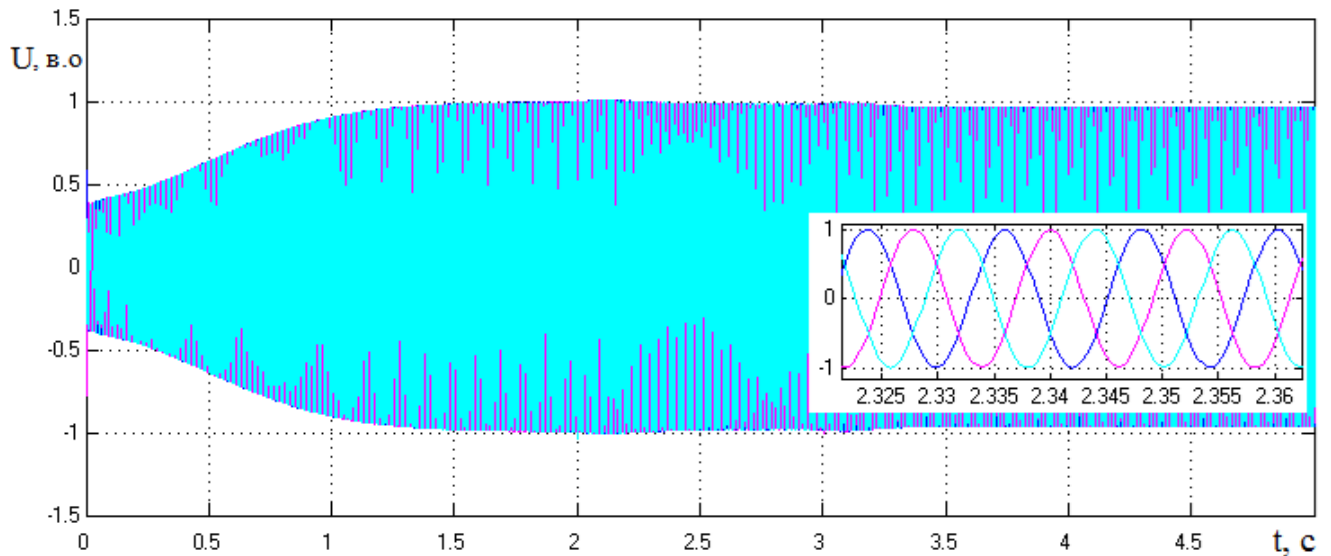


Рис. 3.9. Напряга, що отримана на виході ВЕУ.

При приєднанні навантаження до системи, вимірювана напруга однієї фази починає падати нижче 213 В. Для підтримки стабільної роботи системи в момент приєднання навантаження під'єднуються конденсатори: при $t=2$ с, $C=3,5$ мкФ на фазу та $t=3$ с, $C=4,5$ мкФ на фазу. Також можна спостерігати збільшення струму навантаження (I_{abc_load}) при поданні реактивної потужності від конденсаторів. Під час приєднання навантаження частота на валу ротора (rotor speed ω_m) також падає.

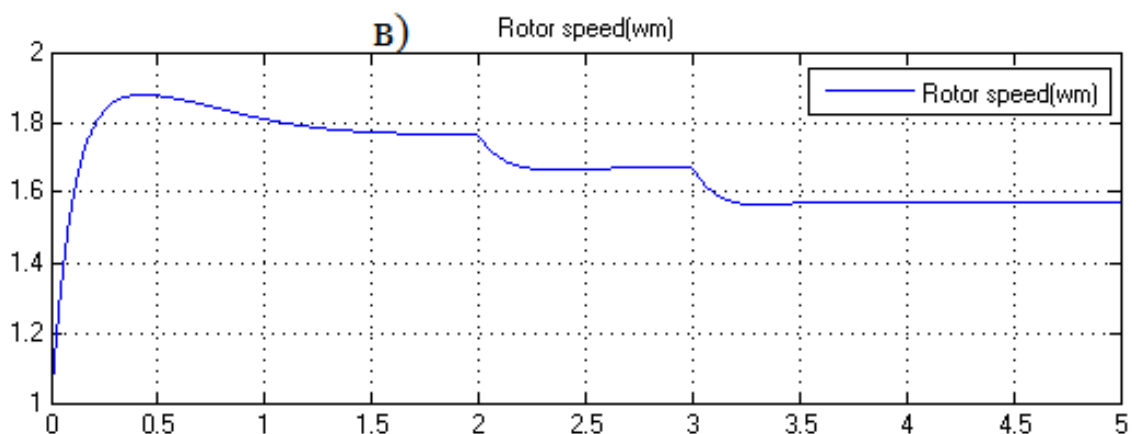


Рис. 3.10. Частота ротора, що отримана на виході ВЕУ з АГ.

На рис.3.10 можна спостерігати, що частота ротора досягає усталеного значення на $t=1,5$ с, після чого приєднується другий споживач, коли $t=2$ с, $R=0,5$ кВт та третій, коли $t=3$ с, $R=0,5$ кВт.

Отримані характеристики системи схеми ВЕУ з АГ з самозбудженням при змінній швидкості вітру наведені на рис. 3.11.

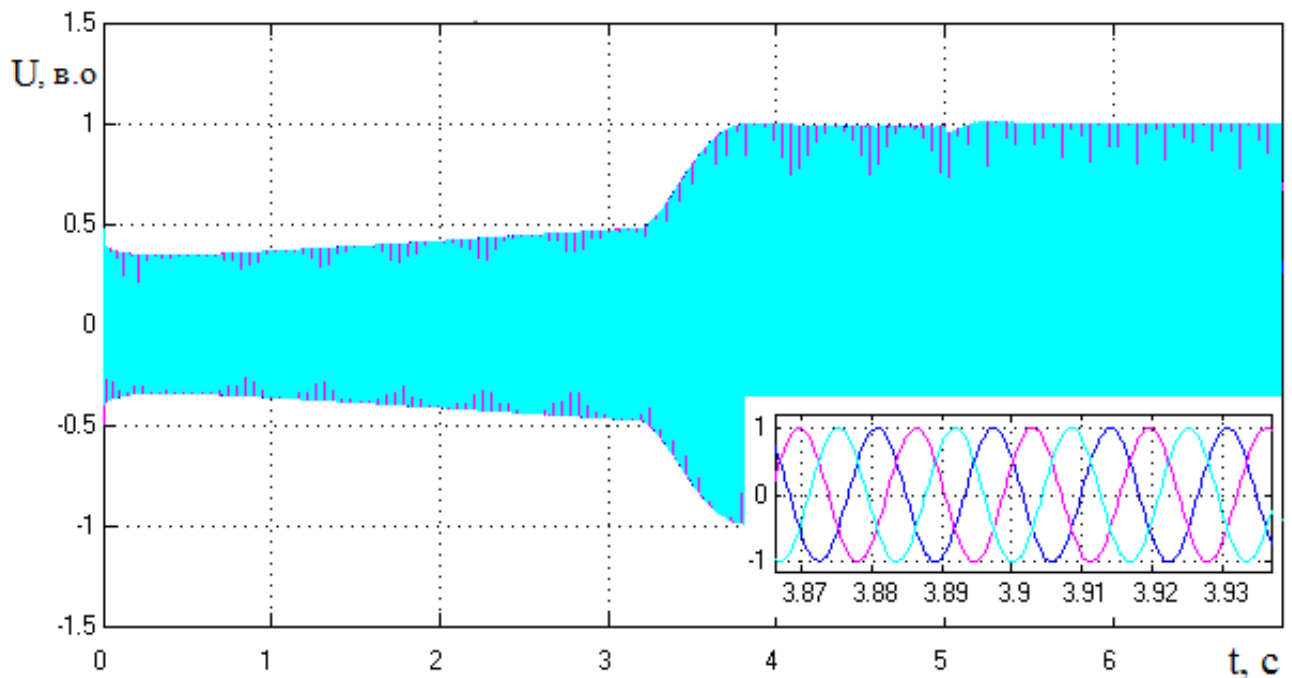


Рис. 3.11. Напряга, що отримана на виході ВЕУ з АГ.

На рис. 3.11 наведені характеристики системи при змінній швидкості вітру. При досягненні швидкості вітру 5 м/с, необхідно подати реактивну потужність від конденсаторів ємністю $C=45$ мкФ на фазу. В проміжку часу до $t=3,2$ с, споживач не приєднаний. Напряга, що генерується, менше 0,5 у відносних одиниць. Після $t=3,2$ с, змінюється швидкість вітру на 6 м/с, де відбувається збільшення напруги близько до 220 В, відповідно приєднується активне навантаження $R=1$ кВт. Струм навантаження зростає до $I=1,5$ А. Для стабілізації системи, коли напряга падає через приєднання споживача, приєднуються конденсатори $C=0,5$ мкФ за фазу. Напряга стабілізується до 0,98 у відносних одиниць. При досягненні $t=5$ с, проводиться збільшення швидкості вітру до 8 м/с, напряга збільшується та відповідно приєднується наступний споживач, який за потужністю в сумі становить $R=1,9$ кВт. Падіння напруги, компенсується приєднанням конденсаторів 1,5 мкФ на фазу.

На рис. 3.12. наведена характеристика частоти на валу ротора генератора при швидкості вітру 5 м/с. В проміжку часу до $t=3,2$ с споживач не приєднаний. Після $t=3,2$ с змінюється швидкість вітру на 6 м/с, де відбувається збільшення

частоти на валу ротора генератора. При досягненні $t=5$ с, проводиться збільшення швидкості вітру до 8 м/с, частота ротора збільшується.

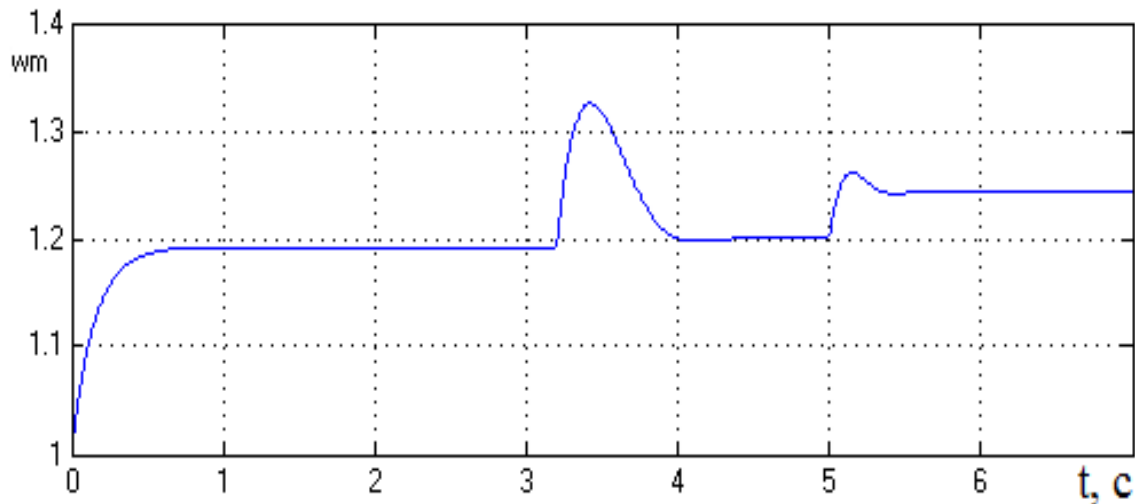


Рис. 3.12. Частота на валу ротора генератора при змінній швидкості вітру.

3.4. Дослідження режимів стабілізації вихідних параметрів автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором

При роботі автономної вітроелектричної установки в асинхронній машині потрібно підтримувати генераторний режим для енергозабезпечення споживача трифазним струмом або підтримувати споживача постійного струму через випрямлячі. Стабілізація напруги та частоти є найскладнішою задачею автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором через його «м'яку» зовнішню характеристику. Відомі різні способи стабілізації напруги та частоти АГ, що аналізується в роботі [99]. Стабілізація вихідної напруги шляхом зміни магнітного потоку, який може бути досягнуто: зміною ємності конденсаторів, приєднаних до обмотки статора; застосуванням керованих реакторів або нелінійних конденсаторів; зміною напруги на конденсаторах; підмагнічуванням осердя статора.

Для стабілізації вихідної напруги автономної вітроелектричної установки з АГ в імітаційній моделі передбачено приєднання додаткових конденсаторів. На рис. 3.13 наведені дані характеристики (у додатку В наведено додаткові характеристики АВЕУ з АГ).

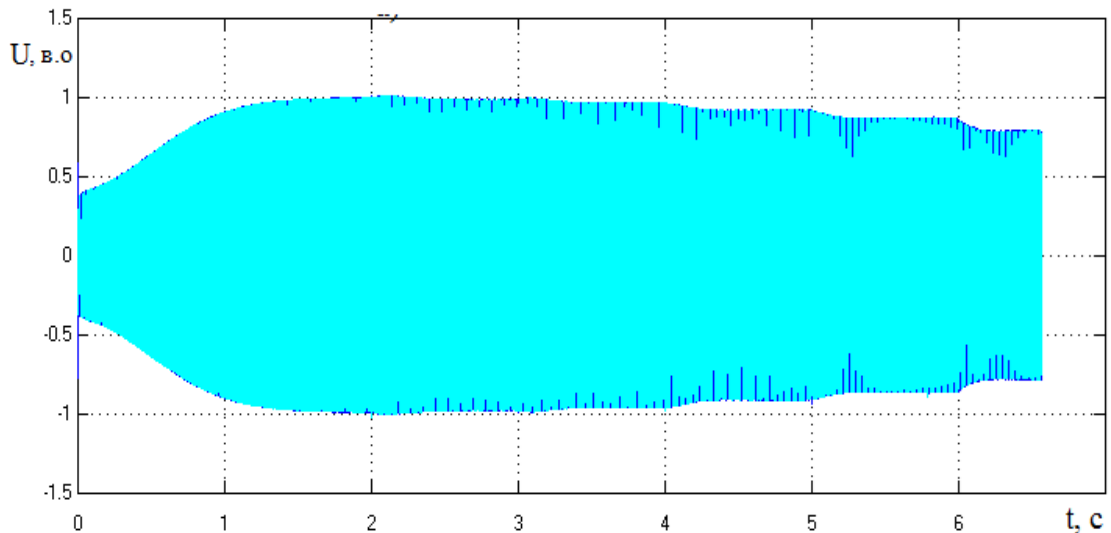


Рис. 3.13. Напряга, що отримана на виході ВЕУ з АГ.

Приєднання додаткового навантаження проводиться послідовно по 500 Вт на 2, 3, 4, 5 і 6 секунді. Для стабілізації напруги підключаються конденсатори відповідною ємністю 3,5, 5, 5,5 мкФ.

На рис.3.14 наведена зміна частота ротора при приєднанні навантаження на 2, 3, 4, 5, 6 с. Всталене значення частоти досягається через 1,5 с.

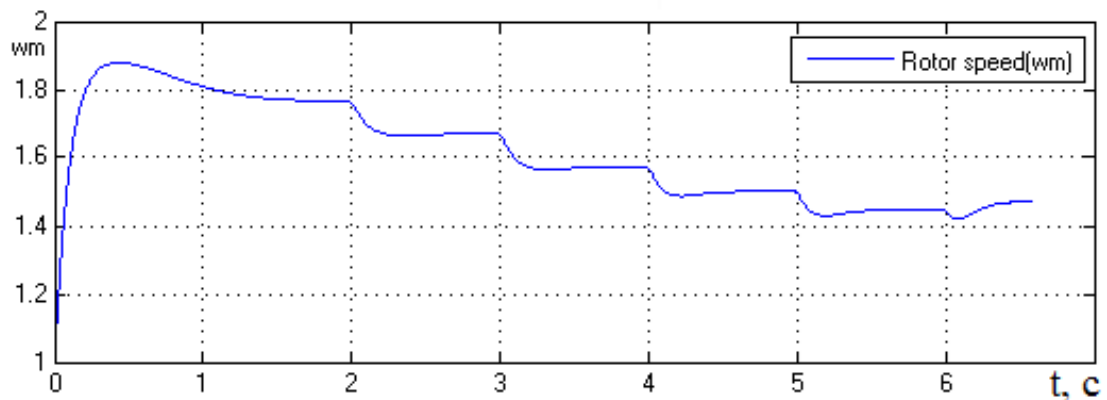


Рис. 3.14. Швидкість ротора, що отримана на виході ВЕУ при ступінчастому приєднанні навантаження.

Аналіз індуктивності кола намагнічування L_m з імітаційної моделі асинхронного генератора з самозбудженням показує, що із зміною її на 1 % падає напруга. Для підтримки напруги потрібно компенсувати струм намагнічування приєднанням додаткових конденсаторів. В цьому випадку ємність конденсаторів збільшується приблизно на 1,4 % від значення початкової ємності при кожному приєднанні навантаження. На рис.3.15 наведена залежність ємності та індуктивного намагнічування.

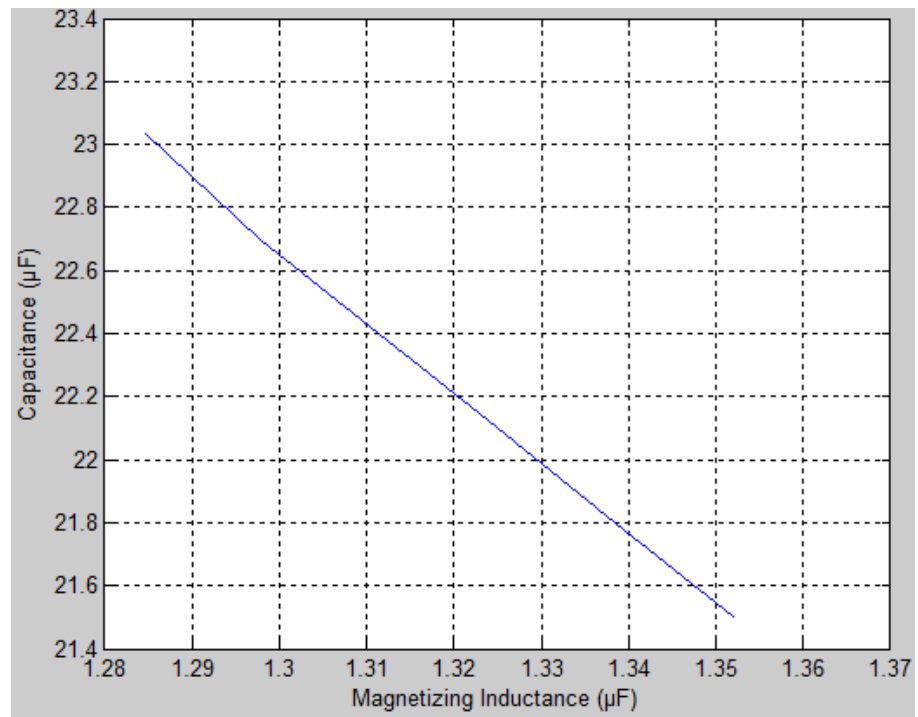


Рис. 3.15. Відношення між ємністю та індуктивністю кола намагнічування.

При під'єднанні додаткового навантаження, наприклад 0,5 кВт, напруга в системі змінюється на 0,98 у відносних одиницях. Щоб забезпечити стабілізацію параметрів системи, додається ємність приблизно на 16,27 % від початкової ємності, тобто 3,5 мкФ на фазу за умови незмінної частоти ротора.

На рис.3.16. наведена залежність ємності конденсаторів при послідовному підключенні активного навантаження по 0,5 кВт.

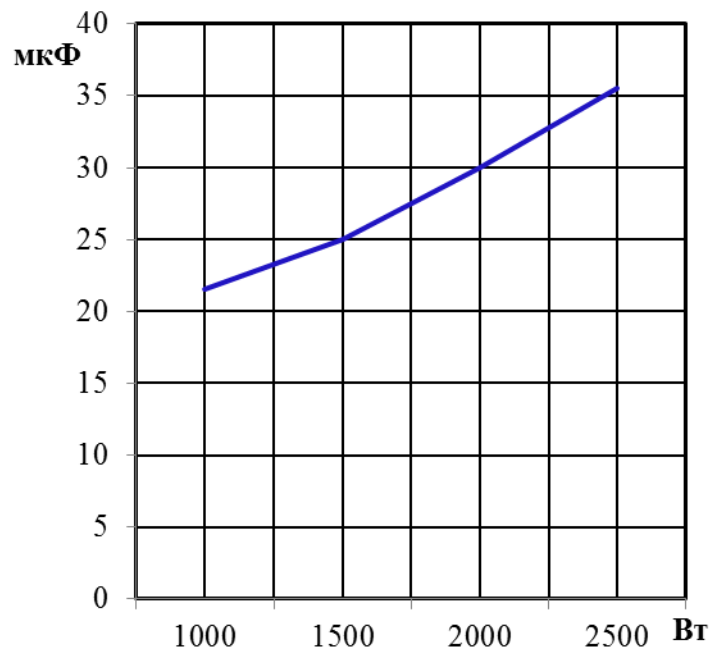


Рис. 3.16. Залежність ємності конденсатора від активного навантаження.

На рис.3.17. наведена характеристика залежності напруги від активного навантаження. Очікувано, що з ростом навантаження напруга спадає.

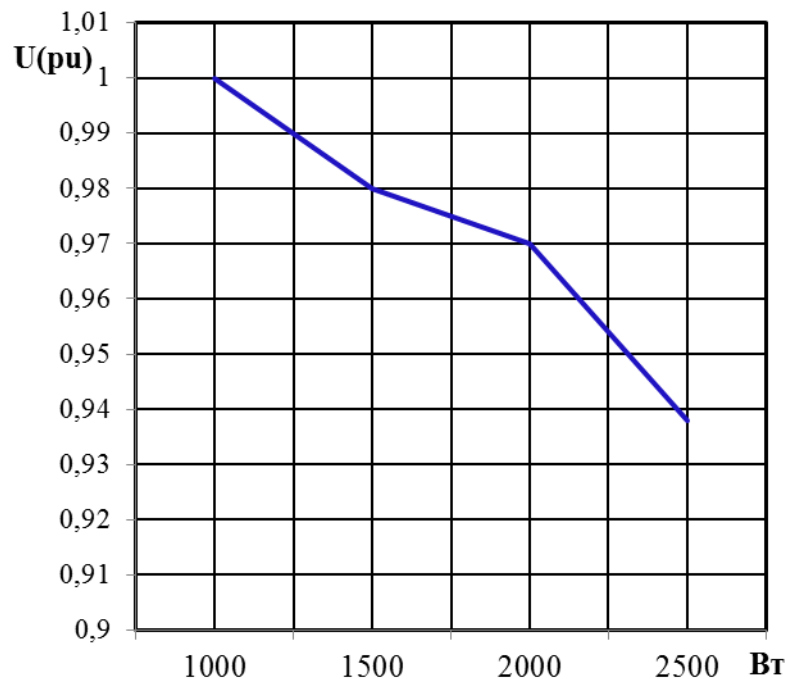


Рис. 3.17. Залежність напруги від активного навантаження.

3.5. Розробка імітаційної моделі автономної вітроелектричної установки з використанням імпульсного перетворювача.

Найбільш складною задачею для роботи ВЕУ є регулювання напруги та частоти під впливом зміни швидкості вітру та утримання показників в робочому режимі, запобігання аварійним ситуаціям [87,89,90,100]. Дослідними роботами передбачалось використання інверторів змінного струму (ЗС) до постійного струму (ПС) для зарядження батареї [35, 101-104]. Для зарядження акумуляторної батареї від вітроагрегату проведено аналіз імпульсного зарядного пристрою в [105]. В даному дослідженні аналізується режим роботи ВЕУ, що працює за допомогою імпульсного перетворювача на зарядження акумуляторної батареї (навантаження). Така схема передбачає покращення умов роботи ВЕУ за рахунок зменшення компенсації реактивної потужності від додаткового блоку конденсаторів, не прямого підключення до споживача, що у свою чергу спрощує схему системи для регулювання напруги та частоти, і за умови покращення підтримки жорсткості характеристики генератора.

Розроблена схема імітаційної моделі автономної вітроелектричної системи з імпульсним перетворювачем наведена на рис. 3.18. До попередньої схеми додані: трифазний діодний випрямляч, імпульсний перетворювач, що працює за допомогою широтної імпульсної модуляції (ШІМ) та підключається до навантаження.

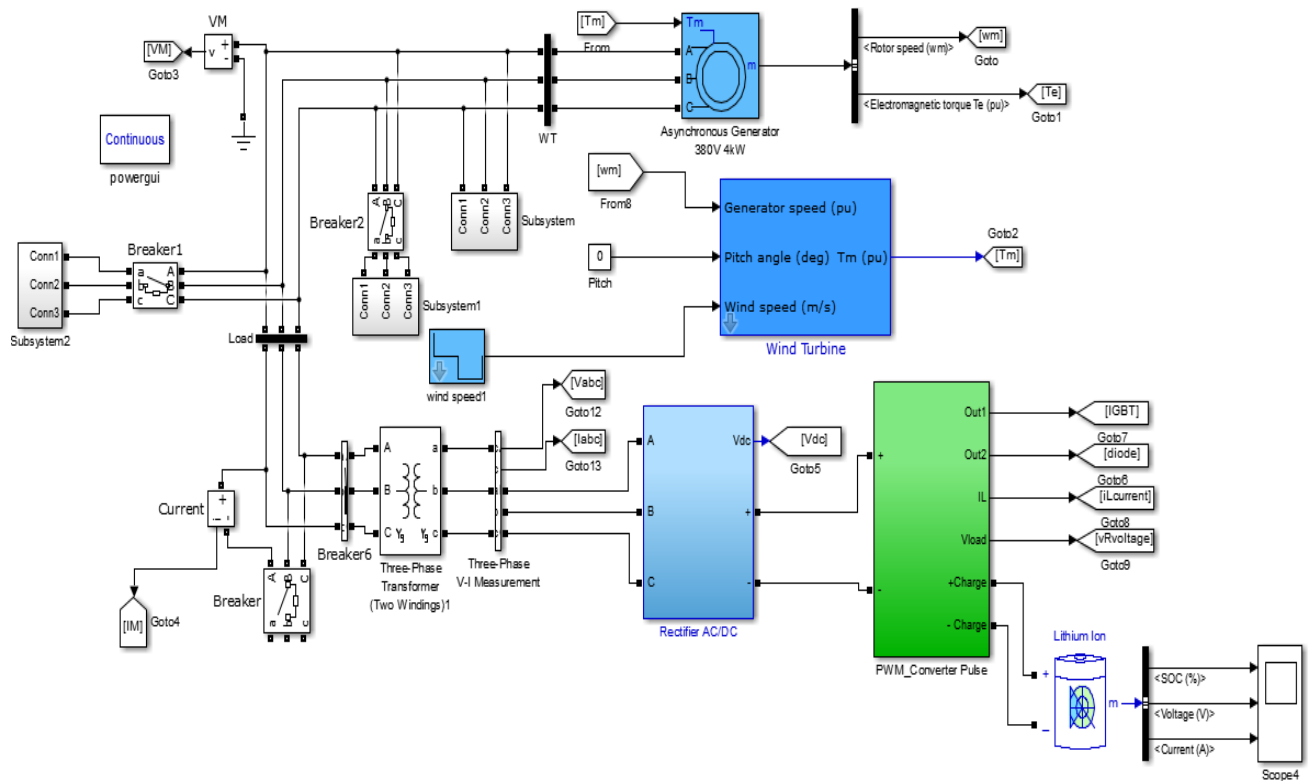


Рис. 3.18. Імітаційна модель ВЕУ з імпульсним перетворювачем.

Проведення дослідження режиму роботи ВЕУ з АГ через імпульсний перетворювач за допомогою ШІМ представляє собою: вітряну турбину під'єднану до валу асинхронного генератора та блоку конденсаторів, які подають потрібну реактивну потужність для самозбудження генератора. До системи підключено трифазний діодний випрямляч, що перетворює змінний струм в постійний. ПС у свою чергу поступає до імпульсного перетворювача. За допомогою ШІМ постійна напруга перетворюється в імпульсну напругу на виході імпульсного перетворювача та подається до навантаження (батареї).

Імпульсний перетворювач повинен періодично підключатися до навантаження (батареї). Керування комутаційним ключем, здійснюється за допомогою широтної імпульсної модуляції (ШІМ). При цьому її робоча частота не повинна перевищувати заданої частоти (в даному випадку 16 Гц). Перехідний

процес, що відбувається в системі ВЕУ з АГ з самозбудженням – головна умова для визначення тривалості вихідного імпульсу t_{off} , тобто $t_{off} < T_a$ (стала часу ВЕУ).

Напруга на виході, визначається як:

$$V_{dc} = \frac{2}{\pi} \int_{\omega t=0}^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \cos(\omega \cdot t) dt, \quad (3.30)$$

де V_{dc} – вихідна постійна напруга;

V_m – пікова напруга живлення.

До входу блока імпульсного перетворювача надходить постійна напруга від трифазного випрямляча.

Робота імпульсного перетворювача наведена на рис. 3.19. Відповідно схеми, коли ключ включений, то напруга проходить через навантаження за тривалістю вихідного імпульсу t_1 , а коли ключ вимкнений, напруга не приходить через навантаження з тривалістю довжини паузи між імпульсами t_2 [106-109].

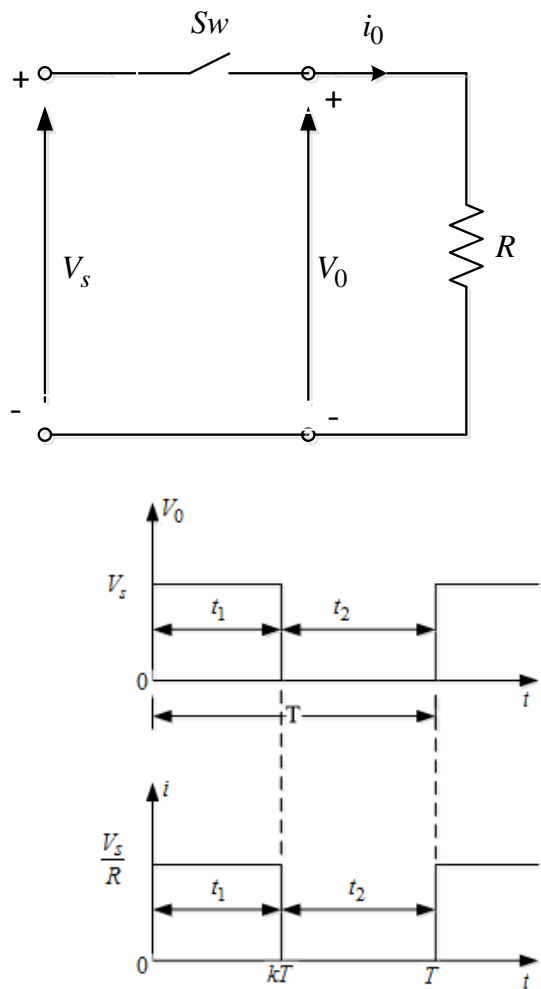


Рис. 3.19. Схема імпульсного перетворювача.

Для перетворення імпульсної напруги в постійну напругу (рис.3.20), використовується дросель L та діод. Протягом інтервалу часу t_1 накопичується енергія в дроселі L , після інтервалу часу паузи t_2 дана енергія передається до навантаження через діод та у роботу підключається паралельно згладжувальний фільтр C .

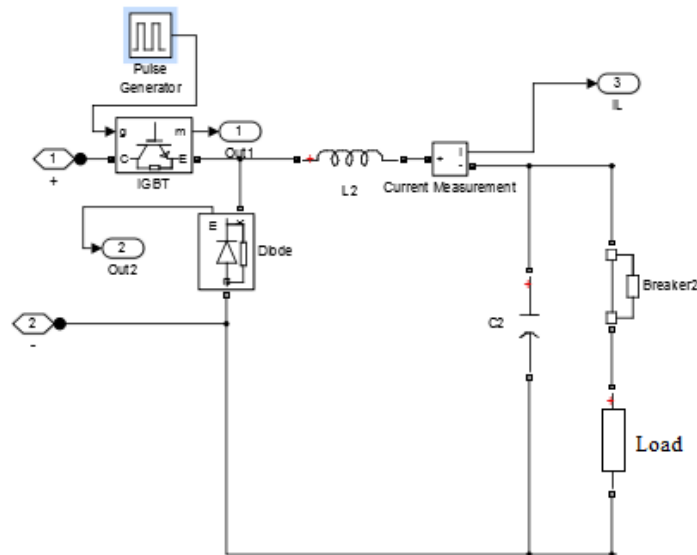


Рис. 3.20. Схема імпульсного перетворювача з згладжувальним фільтром.

Широтна імпульсна модуляція, що керує ключем, здійснюється блоком генератора імпульсів. Напруга на виході складає:

$$V_{out} = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} v_0 dt, \quad (3.31)$$

$$= \frac{t_1}{T} \cdot v_{in}, \quad (3.32)$$

де V_{out} – середнє значення напруги на виході;

T – період.

$$V_{out} = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \cdot V_{in}, \quad (3.33)$$

де t_1 – тривалість часу увімкнення;

t_2 – тривалість часу вимкнення (пауза).

$$V_{out} = k \cdot V_{in}. \quad (3.34)$$

Коефіцієнт заповнення імпульсів складає:

$$k = \frac{V_{out}}{V_{in}}, \quad (3.35)$$

де D – коефіцієнт заповнення імпульсів.

Індуктивність дроселя вираховується за наступною формулою:

$$L = \frac{(V_{in} - V_{out})D}{0.3 \cdot I_{load} \cdot f_{sw}}. \quad (3.36)$$

Ємність конденсатора розраховується за наступною формулою:

$$C = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_{sw} \cdot \Delta V_{out}}, \quad (3.37)$$

де C – мінімальна ємність на виході;

ΔI_L – коливання струму в дроселі;

ΔV_{out} – вихідне коливання напруги (максимум 2%).

$$\Delta I_L = (0.2..0.4) \cdot I_{load}, \quad (3.38)$$

$$\Delta V_{out} \approx 2\% \cdot V_{out}. \quad (3.39)$$

Імпульсний перетворювач використовують для керування напівпровідниковим елементом за допомогою широтної імпульсивної модуляції для регулювання напруги на виході.

Період комутації T розраховується за наступною формулою.

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2. \quad (3.40)$$

Параметри, що вводяться в блок генератора імпульсів є період (Period) – частота від 4 до 16 Гц; ширина імпульсів (Pulse width%) – тривалість часу включення у відсотках.

На рис. 3.21 наведені характеристики АВЕС з АГ з використанням ІІ (при частоті 4 Гц, час вмикання $t_1 = 40\%$, $C = 25$ мкФ).

Характеристики, які отримані при умові, що АВЕС працює при швидкості вітру 8 м/с. При досягненні усталеного значення напруги $U_{\phi} = 220$ В, коли $t = 1$ с імпульсний перетворювач починає працювати. Відповідно шпаруватість сигналу

дорівнює 0,40. При зарядженні акумуляторної батареї виникає падіння величини напруги до 0,985 в.о.

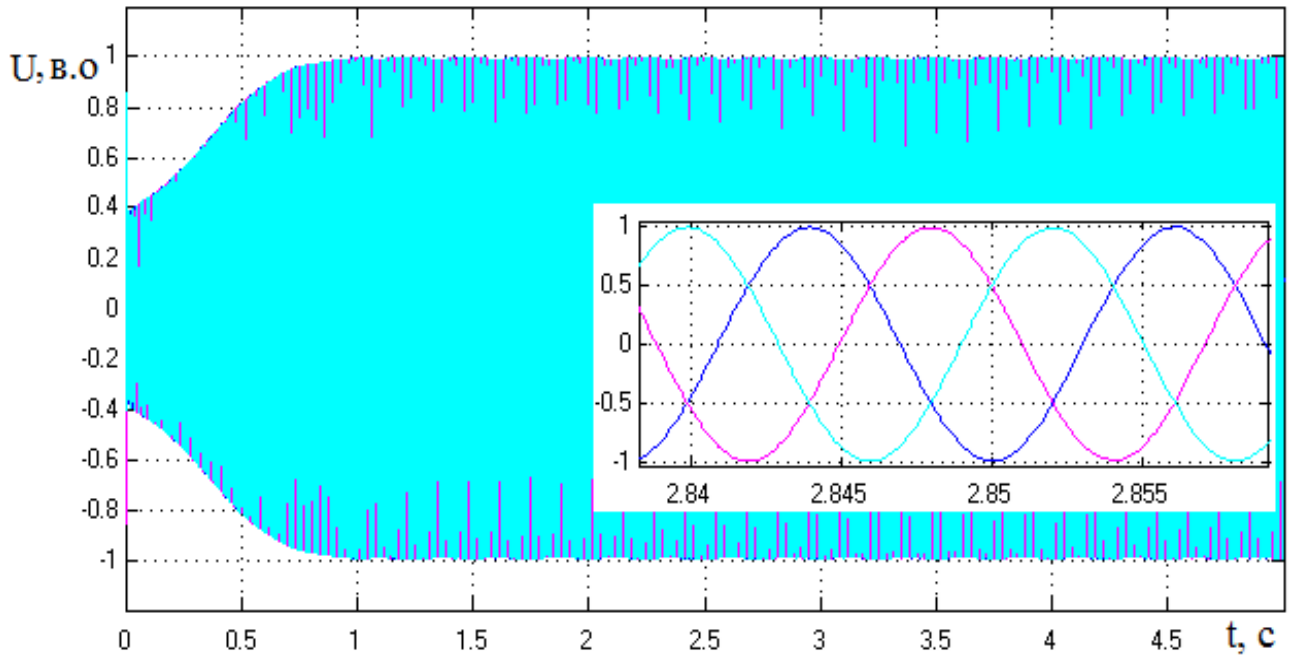


Рис. 3.21. Напряга, що отримана на виході ВЕУ при шпаруватості 0,4.

На рис. 3.22 наведена характеристика АВЕС з АГ з використанням ІІ при шпаруватості до 0,1 при тій же частоті та ємності конденсатора.

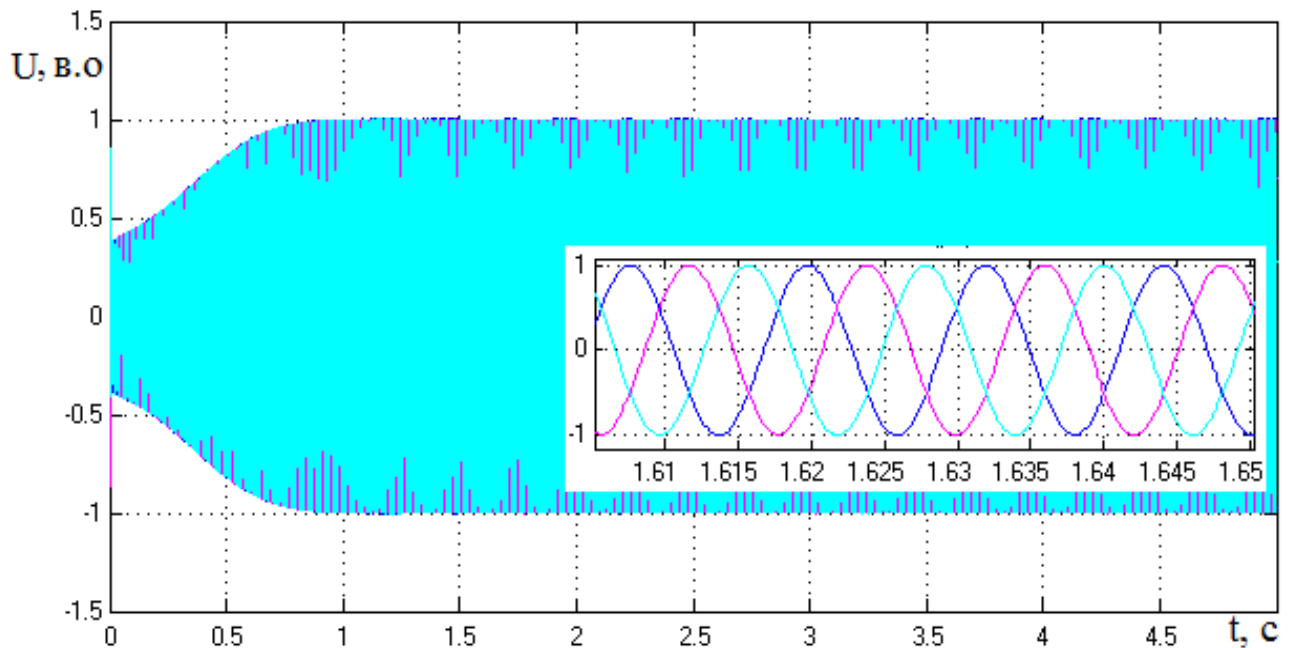


Рис. 3.22. Напряга, що отримана на виході ВЕУ при шпаруватості 0,1.

При швидкості вітру 8 м/с і досягненні номінального значення 220 В починається робота імпульсного перетворювача із шпаруватістю 0,1 та відбувається зарядження акумуляторної батареї, але з меншою інтенсивністю.

Напруга на затискачах генератора змінюється в порядку 0,994 в.о. від номінального значення, тобто не спостерігається суттєвого впливу на роботу ВЕУ.

На рис. 3.23 наведена характеристика напруги АВЕС з АГ з використанням ІІ при зміні шпаруватості до 0,9 при тій же частоті та ємності конденсатора.

Робота ІІ при шпаруватості 0,9 відбувається при тих же значеннях швидкості вітру, зарядження батареї йде з більшою інтенсивністю, спад напруги становить до 0,93 в.о. від номінального значення.

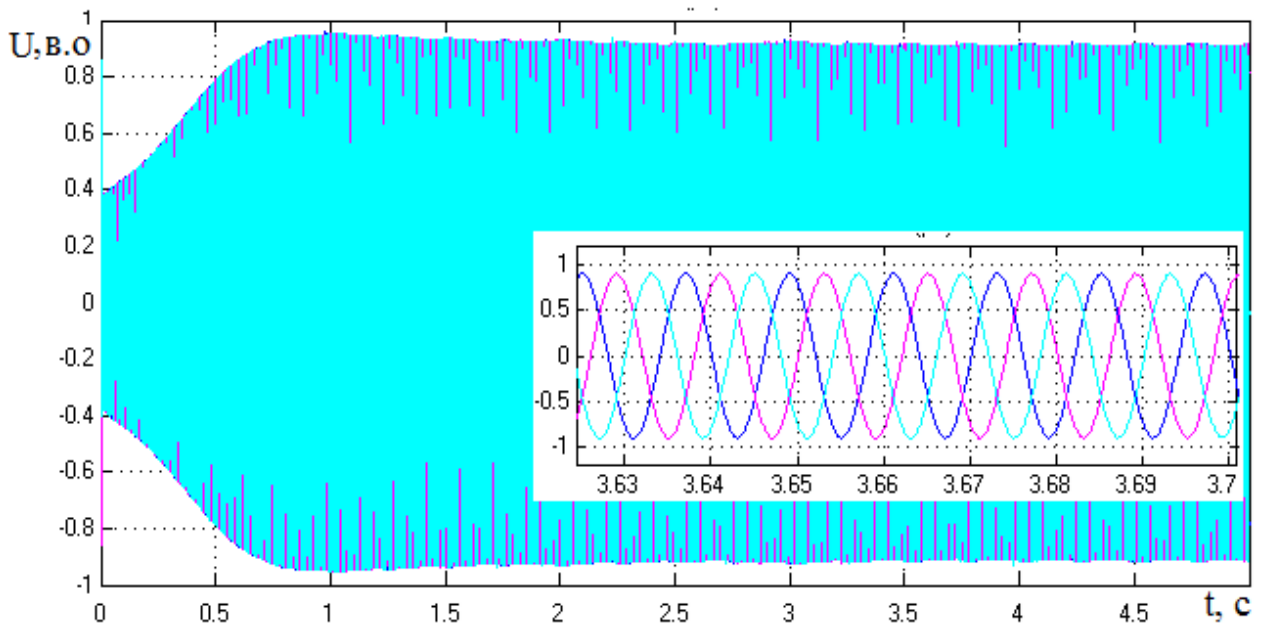


Рис. 3.23. Напруга, що отримана на виході ВЕУ при шпаруватості 0,9.

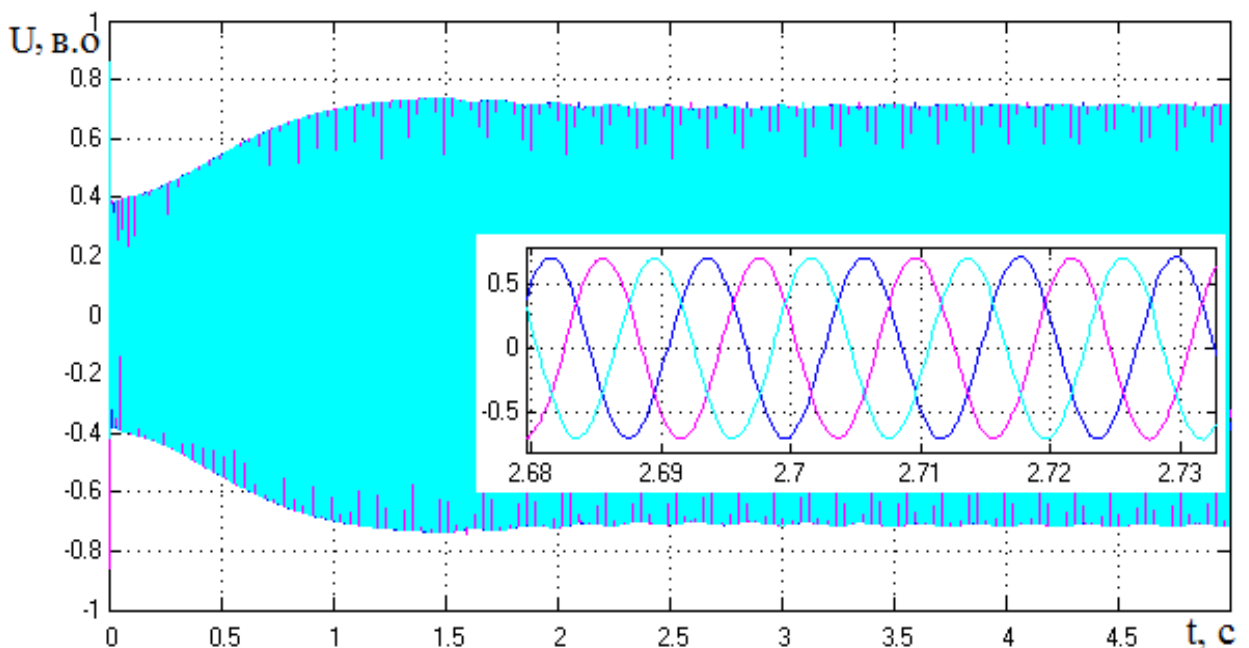


Рис. 3.24. Напруга, що отримана на виході ВЕУ при шпаруватості 0,4.

На рис. 3.24 наведена характеристика у випадку, коли швидкість вітру падає, напруга на затискачах дорівнює 0,74 в.о. від номінального значення. При зарядженні акумуляторної батареї виникає падіння величини напруги до 0,71 в.о.

На рис. 3.25 наведена характеристика у випадку, коли швидкість вітру падає, напруга на затискачах дорівнює 0,73 в.о. від номінального значення.

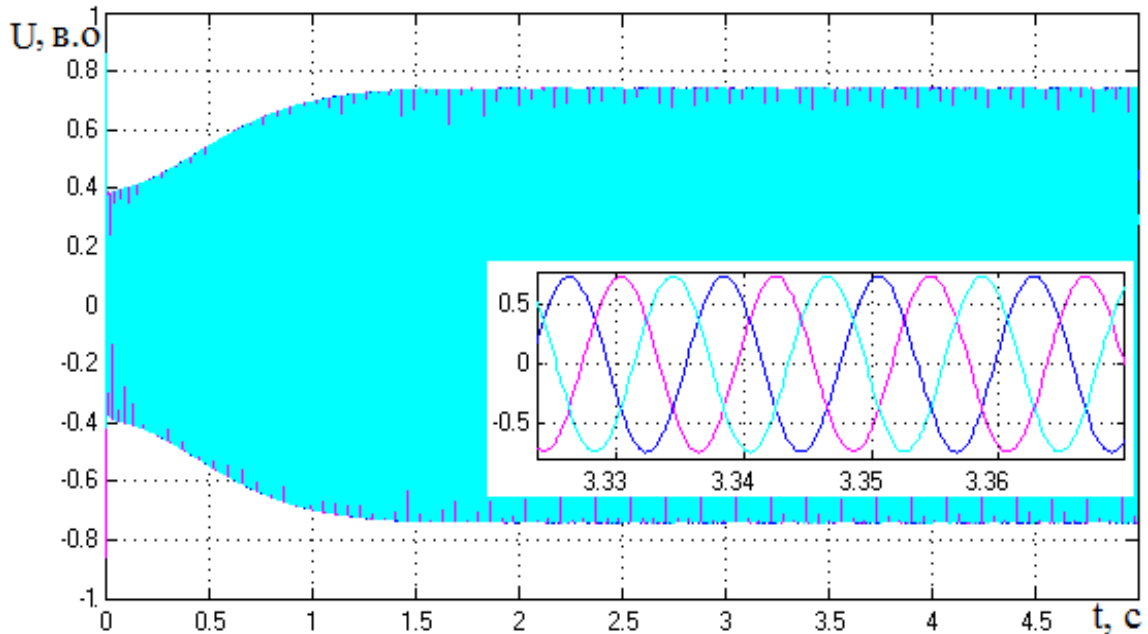


Рис. 3.25. Напруга, що отримана на виході ВЕУ при шпаруватості 0,1.

На рис. 3.26 наведена характеристика у випадку, коли швидкість вітру падає, напруга на затискачах дорівнює 0,67 в.о. від номінального значення.

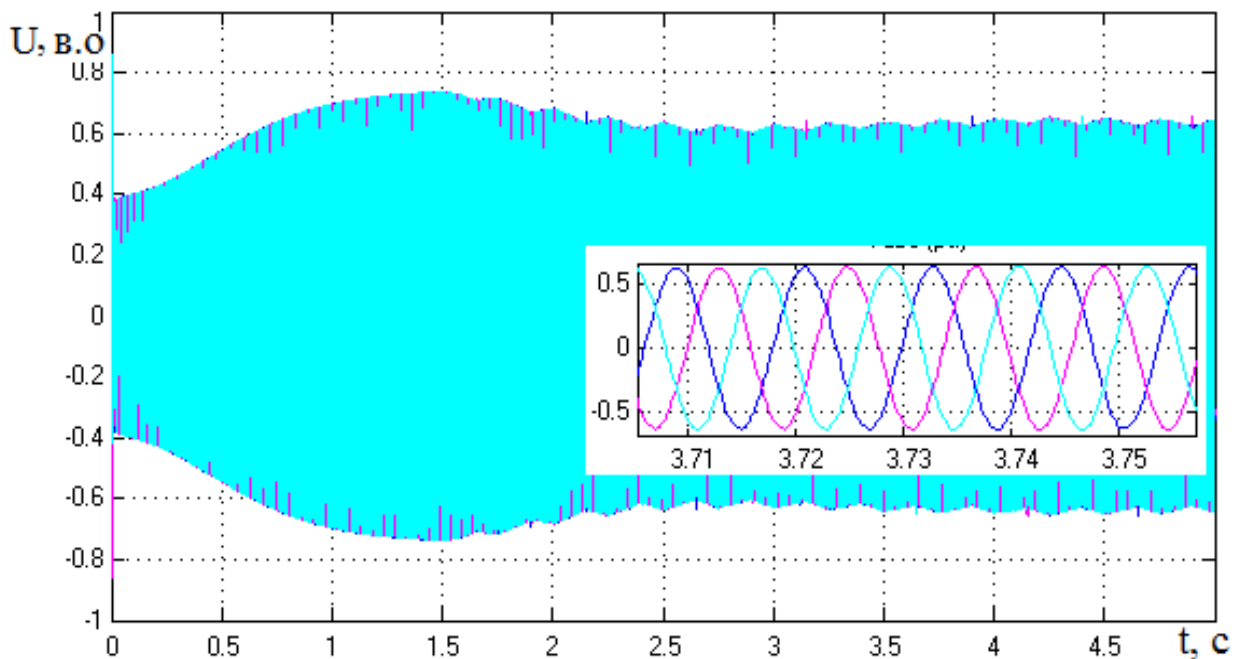


Рис. 3.26. Напруга, що отримана на виході ВЕУ при шпаруватості 0,9.

На рис. 3.27 наведена характеристика у випадку, коли швидкість вітру падає до 0,8 % від номінальної, напруга на затискачах дорівнює 0,86 в.о. від номінального значення. При зарядженні акумуляторної батареї спад напруги досягає до 0,79 в.о.

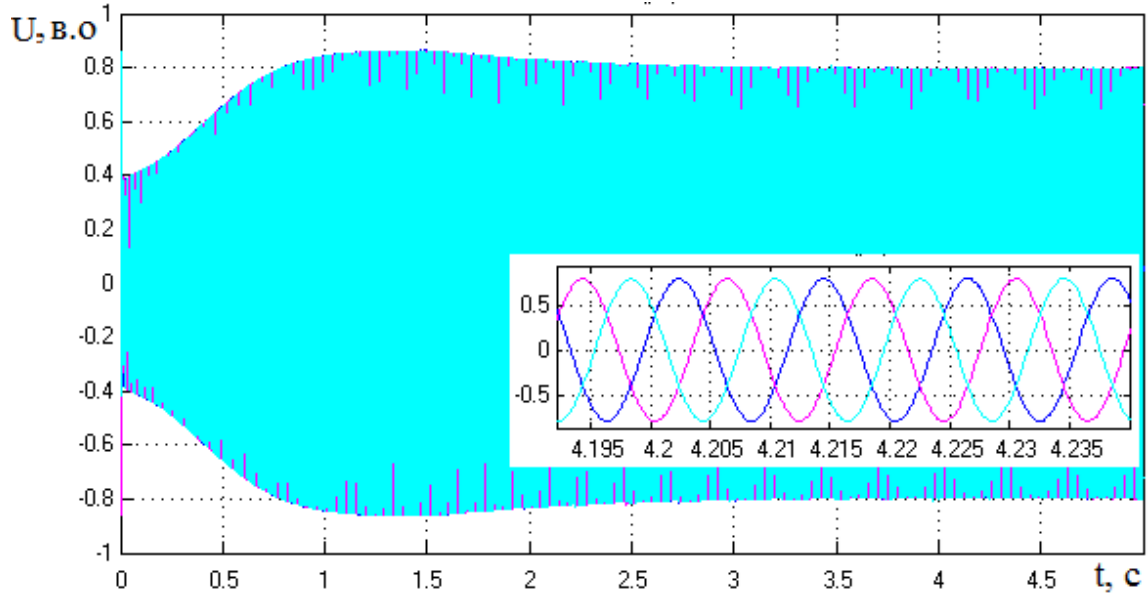


Рис. 3.27. Напруга, що отримана на виході ВЕУ при швидкості вітру 0,8 % від номінальної та шпаруватості 0,9.

На рис. 3.28 наведена характеристика при швидкості вітру 0,8 % номінальної та шпаруватості сигналу 0,4. При зниженні швидкості вітру, напруга на затискачах дорівнює 0,86 в.о. від номінального значення.

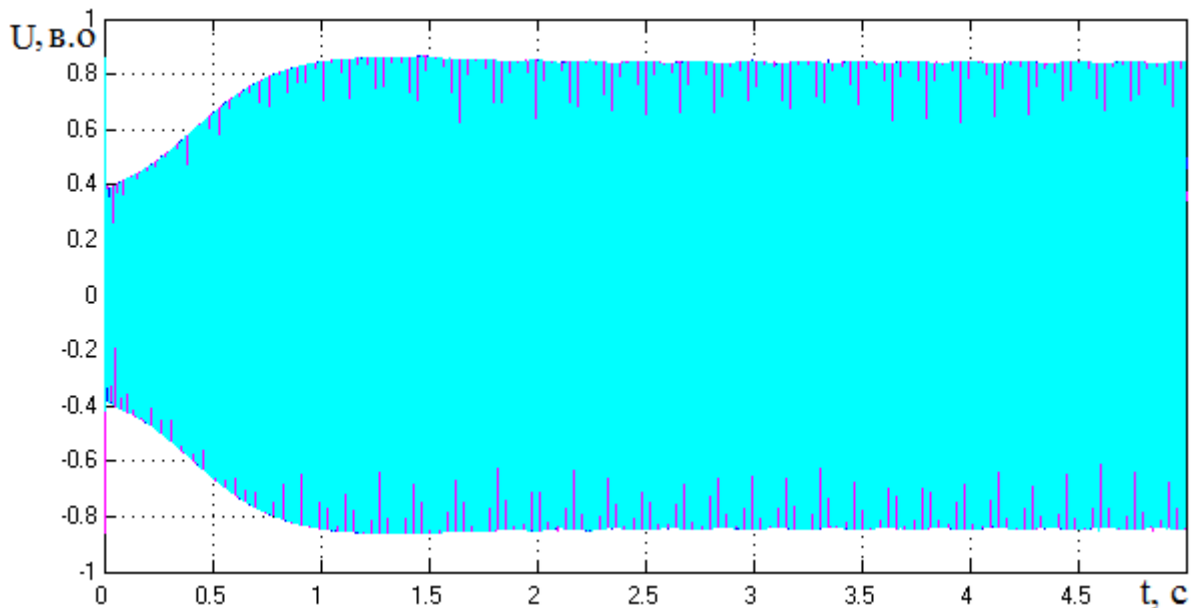


Рис. 3.28. Напруга, що отримана на виході ВЕУ при швидкості вітру 0,8 від номінальної та шпаруватості 0,4.

На рис. 3.29 наведена характеристика при швидкості вітру 0,8 % від номінальної та шпаруватості сигналу 0,1.

При шпаруватості 0,1 напруга на затискачах дорівнює 0,86 в.о., тобто спаду напруги при такому режимі зарядження не відчувається. Таким чином, маніпулюючи режимами роботи імпульсного перетворювача в умовах коливання швидкості вітру можна досягти стійкої роботи генераторного обладнання вітроелектроустановки і створювати умови для максимально можливого відбору енергії вітру.

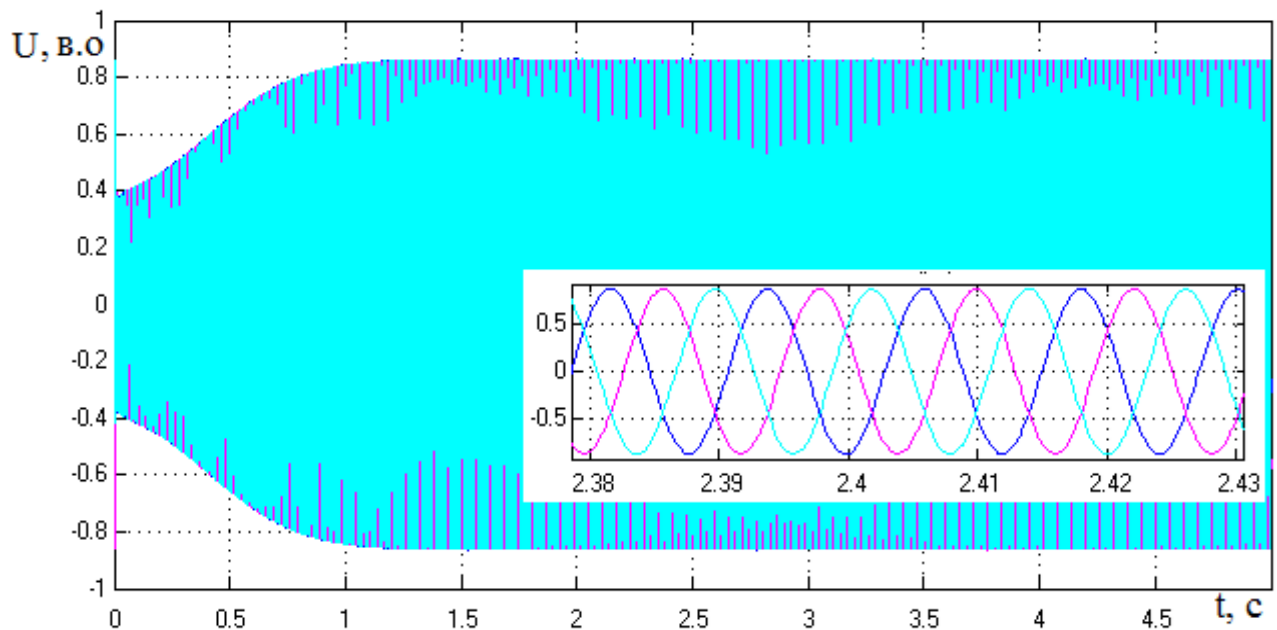


Рис. 3.29. Напруга, що отримана на виході ВЕУ при швидкості вітру 0,8 номінальної та шпаруватості 0,1.

При визначенні ємності конденсатора для збудження генератора необхідно враховувати також додаткову ємність для компенсації реактивної потужності при приєднанні навантаження.

На рис.3.30 наведена залежність вихідної напруги системи при різних значеннях коефіцієнта заповнення імпульсів.

Криві рис. 3.30 отримані при умові, що швидкість вітру складає до 8 м/с. З графіків видно, що при коефіцієнті заповнення імпульсів 90 % фазна напруга має мінімальне значення. При зменшенні значення коефіцієнта заповнення напруга збільшується. Тобто при збільшенні часу паузи проходить скидання навантаження з генератора. В той же час, коли АВЕС з АГ приєднана до

навантаження через ІІ, при зменшенні ємності з 27 мкФ до 21 мкФ блоку конденсаторів, АГ не втрачає збудження.

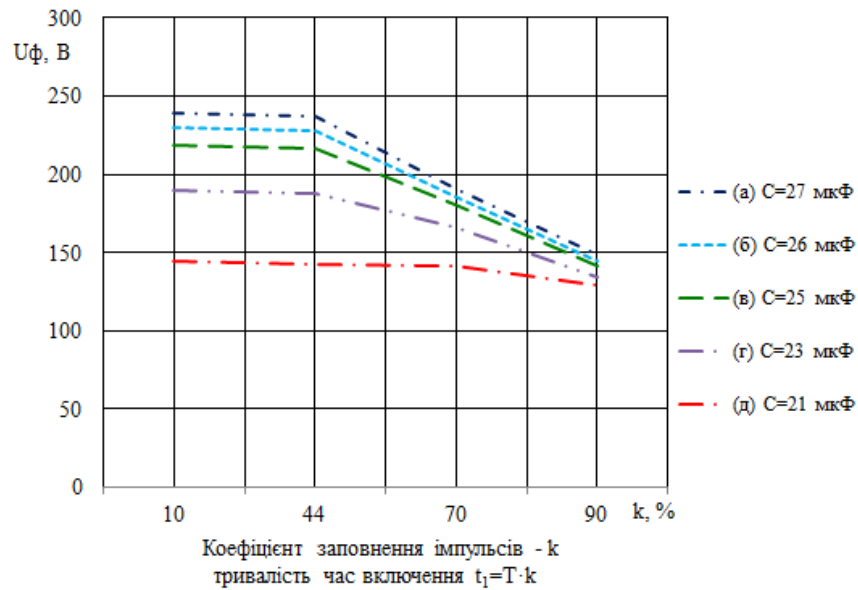


Рис. 3.30. Характеристики залежності вихідної напруги від коефіцієнта заповнення імпульсів.

Різде падіння напруги, що можна спостерігати за кривою рис.3.30, це є результатом збільшення напруги та струму на виході ІІ, який подається для зарядження батареї. Це падіння відбувається на початку зарядження акумуляторної батареї, після чого повино проводитися регулювання величини напруги до певного значення напруги для зарядження.

На рис. 3.31 наведені результати моделювання при змінних значеннях швидкості вітру (8 м/с, 7 м/с та 6 м/с).

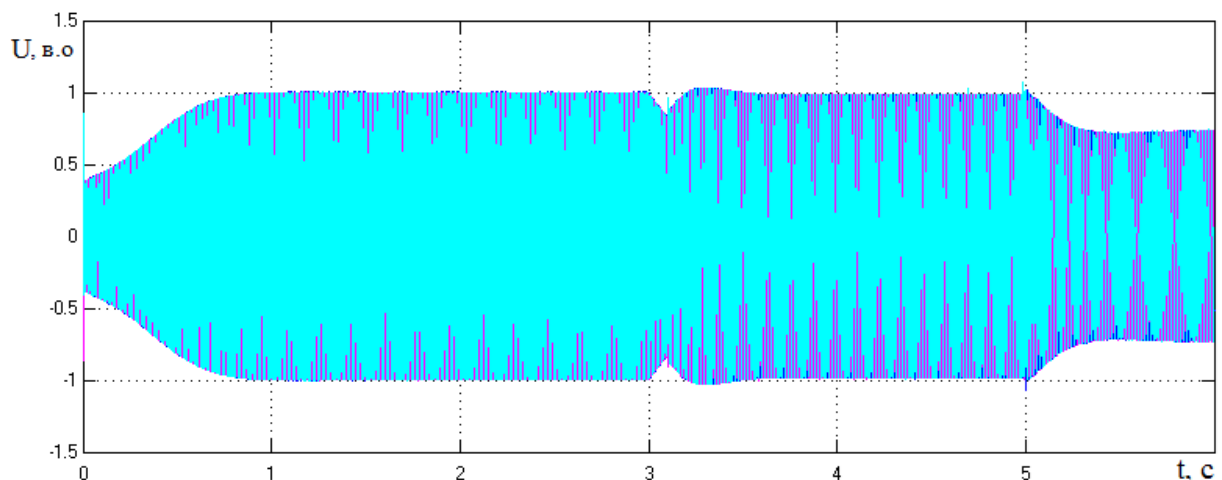


Рис. 3.31. Напруга, що отримана на виході АВЕС з АГ з використанням ІІ (при частоті 4 Гц, час вмикання $t_1=10\%$, $C=25$ мкФ).

При падінні напруги внаслідок зниження швидкості вітру необхідна компенсація реактивної потужності приєднанням конденсатора 15 мкФ через 3 с та 10 мкФ через 5 с.

Залежність вихідної напруги системи від зміни швидкості вітру при різних коефіцієнтах заповнення імпульсів наведені на рис. 3.32.

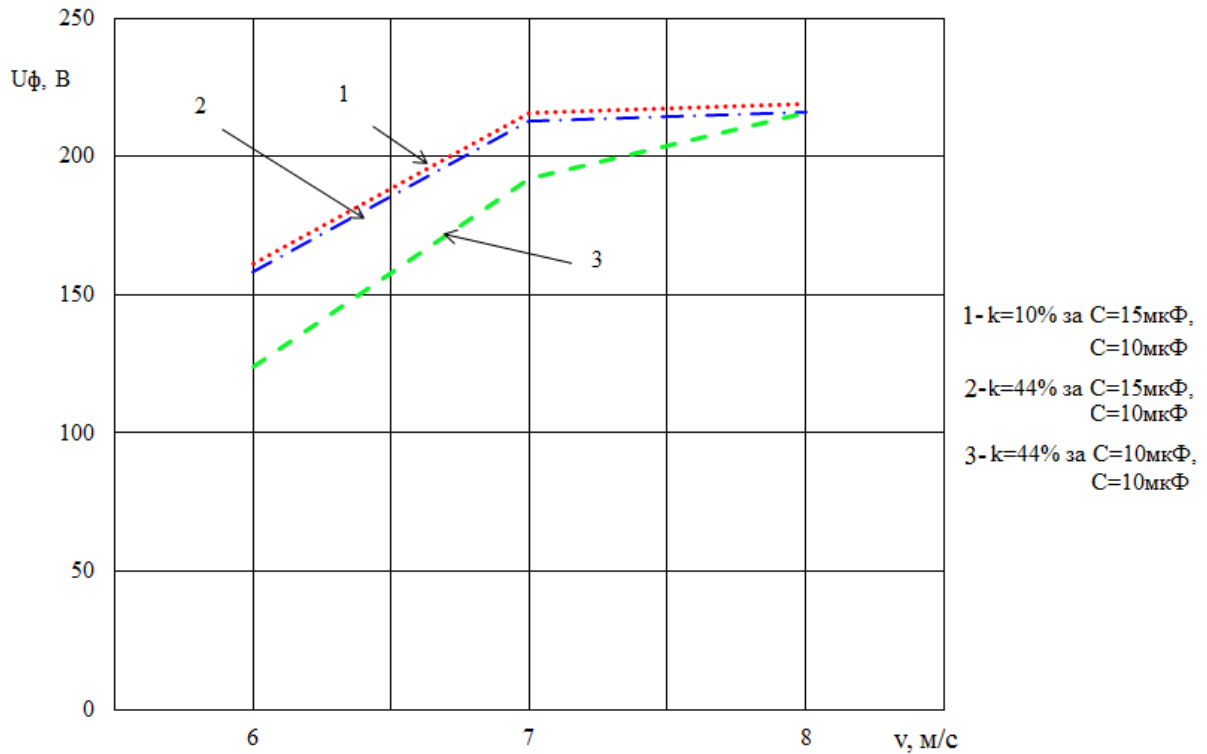


Рис. 3.32. Залежність вихідної напруги системи від зміни швидкості вітру при різних коефіцієнтах заповнення імпульсів.

У випадку зниження швидкості вітру до 6 м/с фазна напруга падає приблизно до 158 В (крива 2). Тоді шляхом регулювання тривалості часу вмикання до 10 %, напруга підвищується до 161 В (крива 1). Тобто зі збільшенням тривалості часу вмикання (час паузи) скидається навантаження АВЕС. Зі зменшенням навантаження підтримується генераторний режим роботи та існує можливість зменшення додаткової компенсації реактивної потужності від блоку конденсаторів. При швидкості вітру до 7 м/с, напруга падає до 126 В, введення конденсатора ємність 10 мкФ компенсує її зниження (крива 3).

Даний приклад демонструє, що замість додаткового збільшення ємності конденсаторів, коли швидкість вітру знижується, слід регулювати час паузи для відновлення попереднього значення напруги.

Під час проведення аналізу було виявлено, що поки не втрачається генераторний режим роботи асинхронної машини, можна використовувати її максимальну вироблену енергію, що отримується через імпульсний перетворювач, який заряджає акумуляторну батарею.

3.6. Висновки за розділом

1. Розроблена імітаційна модель автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором дозволила визначати режим роботи при активному навантаженні як при постійній, так і при змінній швидкості вітру.

2. Отримані результати за допомогою імітаційного моделювання ВЕУ з АГ з підключенням імпульсного перетворювача показують, що під час регулювання заповнення імпульсу, тобто час включення від 10 % до 90 %, можна максимально використовувати енергію, що виробляє АВЕС.

3. Проведені дослідження показують, що керування імпульсним перетворювачем з широтно-імпульсною модуляцією дозволяє підтримати режим роботи АГ при різких змінах швидкості вітру та зменшити додаткову ємність для компенсації реактивної потужності.

РОЗДІЛ 4

СТЕНДОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ З АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ

Програмою експериментальних досліджень передбачалось:

- дослідити процес стабілізації напруги на затискачах генератора за рахунок введення компенсуючих конденсаторів при зростанні навантаження;
- дослідити вплив величини шпаруватості імпульсу перетворювача для зарядження акумуляторних батарей на вихідні показники асинхронного генератора вітроелектроустановки за різних значень швидкості вітру.

Процес стабілізації напруги на затискачах генератора за рахунок введення компенсуючих конденсаторів при зростанні навантаження проводився після самозбудження асинхронного генератора на холостому ході. При досягненні номінальних параметрів напруги приєднувалося симетричне трифазне активне навантаження (лампи розжарювання), величина якого обмежувалась падінням напруги, що складало 10% номінальної. Після цього вмикалась додаткова група конденсаторів, щоб компенсувати падіння напруги.

Вплив величини шпаруватості імпульсу перетворювача на вихідні показники асинхронного генератора визначався за реакцією системи після періодичного приєднання до навантаження (акумуляторної батареї). Керування комутаційним ключем, здійснювалося за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Імітування зниження швидкості вітру проводилося за допомогою регулятора швидкості валу приводного двигуна (паралельного збудження) асинхронного генератора, що призводило до падіння напруги.

4.1. Розробка стенду для дослідження режимів роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором

Стенд для дослідження режимів роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором містить регульовані приводні двигуни, вимірювальні засоби, що дозволяють як візуально, так і в режимі комп'ютерного запису фіксувати процеси експерименту, блоки навантаження та компенсуючих

конденсаторів. За допомогою регулятора напруги та блоку навантаження є можливість проводити дослідження при різних значеннях кутової швидкості та навантаженні, що мають місце в реальних умовах експлуатації.

Стенд складається з наступних частин: ввідного автоматичного вимикача (АВ), трансформатора (Т), блока керування двигуном постійного струму (БК), електродвигуна постійного струму (ДПС), об'єкта, що досліджується (електрогенератора), тахогенератора або тахометра.

Блок-схема стенду наведена на рис.4.1.

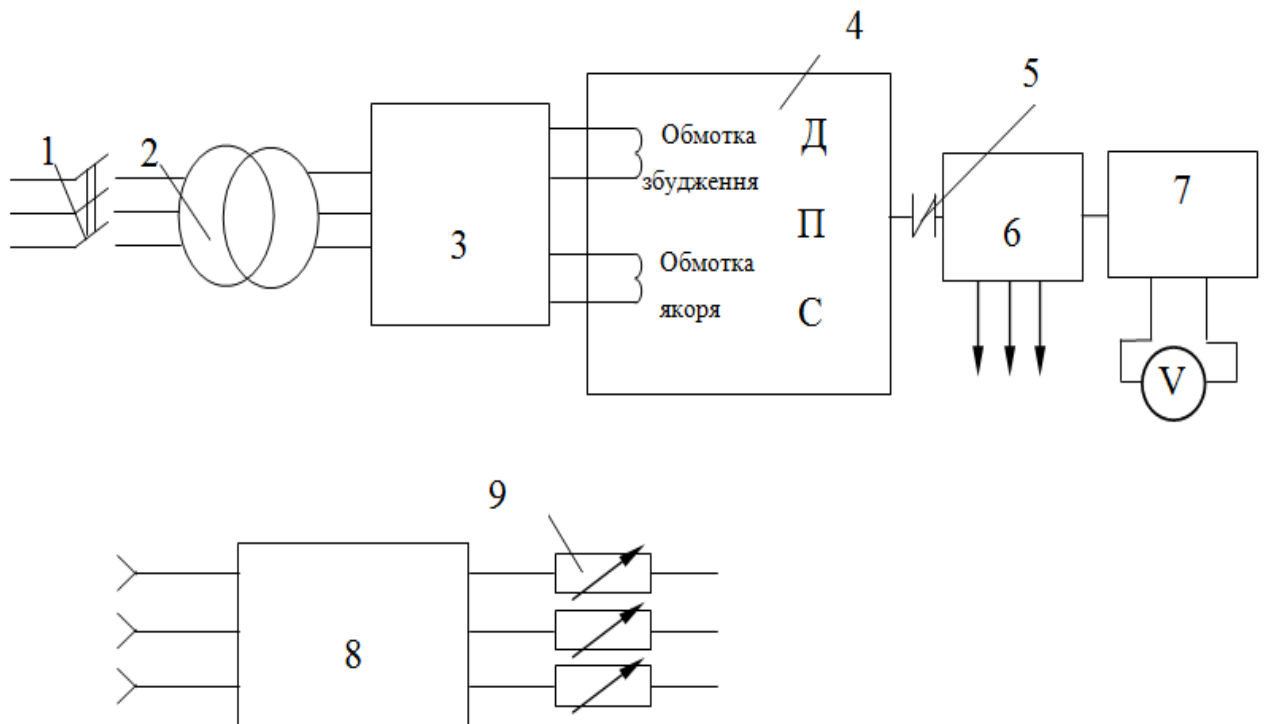


Рис. 4.1. Блок-схема стенду: 1 – ввідний автоматичний вимикач; 2 – трансформатор; 3 – блок керування двигуном постійного струму; 4 – електродвигун постійного струму; 5 – муфта; 6 – електрогенератор; 7 – тахогенератор; 8 – вимірювальний комплекс; 9 – регулятор навантаження.

БК складається з блока збудження, реактора, автоматичних вимикачів для силового кола та системи керування. Принцип роботи оснований на властивостях і характеристиках керованих випрямлячів. Силова частина виконана з двох зустрічно-паралельно увімкнених трифазних мостових тиристорних керованих випрямлячів, що працюють за принципом роздільного керування. Даний блок складається з системи імпульсно-фазового керування, виконаної за принципом

одноканального керування двома протифазними тиристорами випрямляючого мосту. Канали фазозміщення виконані за вертикальним принципом керування з лінійно зростаючою опорною напругою.

Працює стенд наступним чином. Живлення на трансформатор подається вмиканням на щитку вхідного автоматичного вимикача.

Якірна обмотка БК під'єднується до клем 220 В регулювання. Подається напруга ~ 220 В до трифазних та однофазних клем. Тумблером на лицьовій панелі вмикається система керування і канал обмотки збудження. Потенціометром на лицьовій панелі вмикається система керування і канал обмотки збудження. Потенціометром на лицьовій панелі регулюється напруга якірного ланцюга в межах 0-220 В, в залежності від чого оберти ДПС змінюються від 0 до максимального значення. Регулювання слід виконувати з нульового положення потенціометра. Вибираючи за показанням тахогенератора або тахометра необхідні оберти електрогенератора при різних величинах навантаження, що встановлюються на блоці регульованих навантажень, за допомогою вимірювального комплексу, змінюються необхідні показники.

Для вимірювання електричних величин використовується вимірювальний комплекс, що дозволяє пофазне вимірювання струму, напруги та скоригованої активної потужності (клас точності 0,5). При навантаженні більш 10 А необхідне застосування трансформаторів струму класу точності не нижче 0,5.

Для вимірювання механічних величин, в даному випадку обертів ДПС (або електрогенератора) використовується тахогенератор типу ТНГ-30.

4.2. Дослідження процесів стабілізації вихідних параметрів автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором

На рис.4.2 наведені порівняльні характеристики результатів імітаційного моделювання та експериментальних досліджень процесу стабілізації напруги на затискачах генератора за рахунок введення компенсуючих конденсаторів при зростанні навантаження.

Крива 1 отримана при наступній послідовності дій. При досягненні номінальної напруги на затискачах генератора при холостому ході подавалося симетричне трифазне активне навантаження (лампи розжарювання). При падінні напруги на 10 % від номінальної – під'єднувалася додаткова група конденсаторів, щоб компенсувати величину падіння. Навантаження зростало від 0,4 до 1,2 від номінального значення (2,2 кВт). Крива 2 отримана при тій же послідовності дій, але за допомогою імітаційного моделювання. Навантаження додавалося від 0,5 до 2,5 кВт. Величина розбіжності складає в межах 7%.

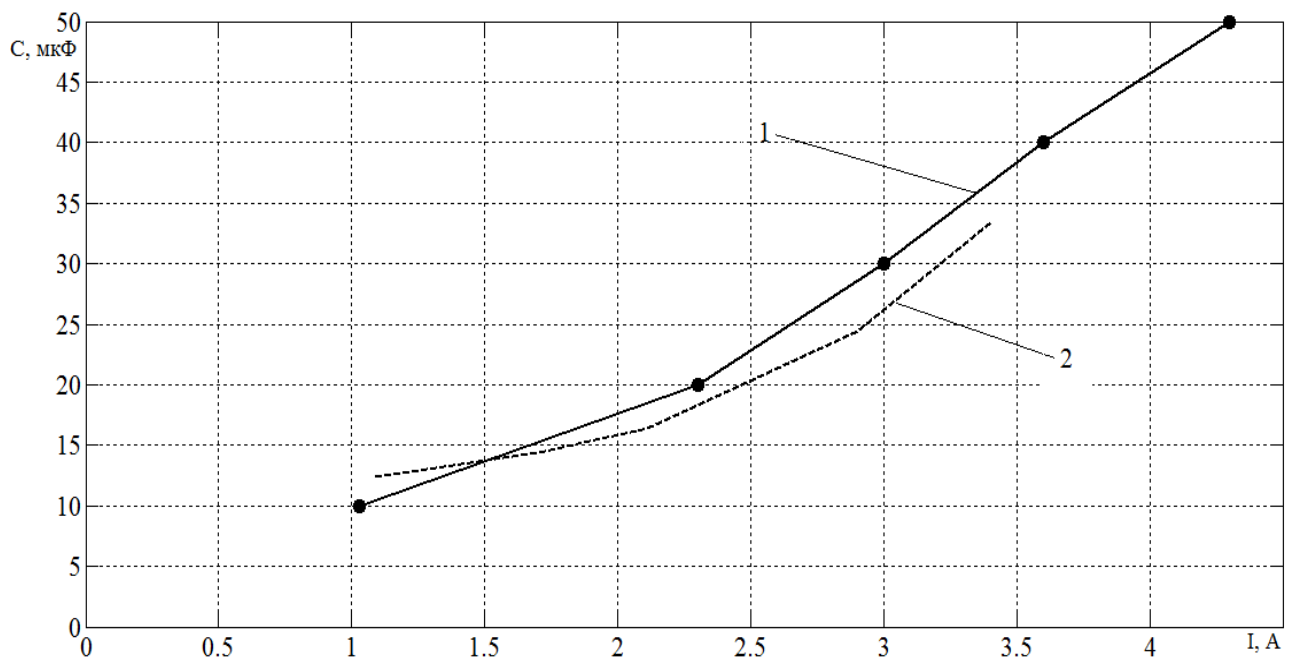


Рис. 4.2. Залежність ємності конденсаторів від навантаження на генераторі при стабілізації вихідної напруги на затискачах. 1 – експериментальна, 2 – з імітаційної моделі.

4.3. Дослідження впливу величини шпаруватості імпульсу перетворювача на вихідні показники асинхронного генератора вітроелектроустановки за різних значень швидкості вітру

При дослідженні впливу величини шпаруватості імпульсу перетворювача на вихідні показники асинхронного генератора вітроелектроустановки за різних значень швидкості вітру до стенду додатково був введений імпульсний перетворювач (рис. 4.3).

Встановлюючи за показанням тахогенератора необхідні оберти електрогенератора, що відповідають швидкості вітру нижче номінальної в діапазоні від 0,95 % до 0,75 %, регулювалась шпаруватість імпульсів з метою утримання вітроустановки в генераторному режимі і проводився запис вимірювальним комплексом необхідних показників. Навантаженням слугувала акумуляторна батарея.

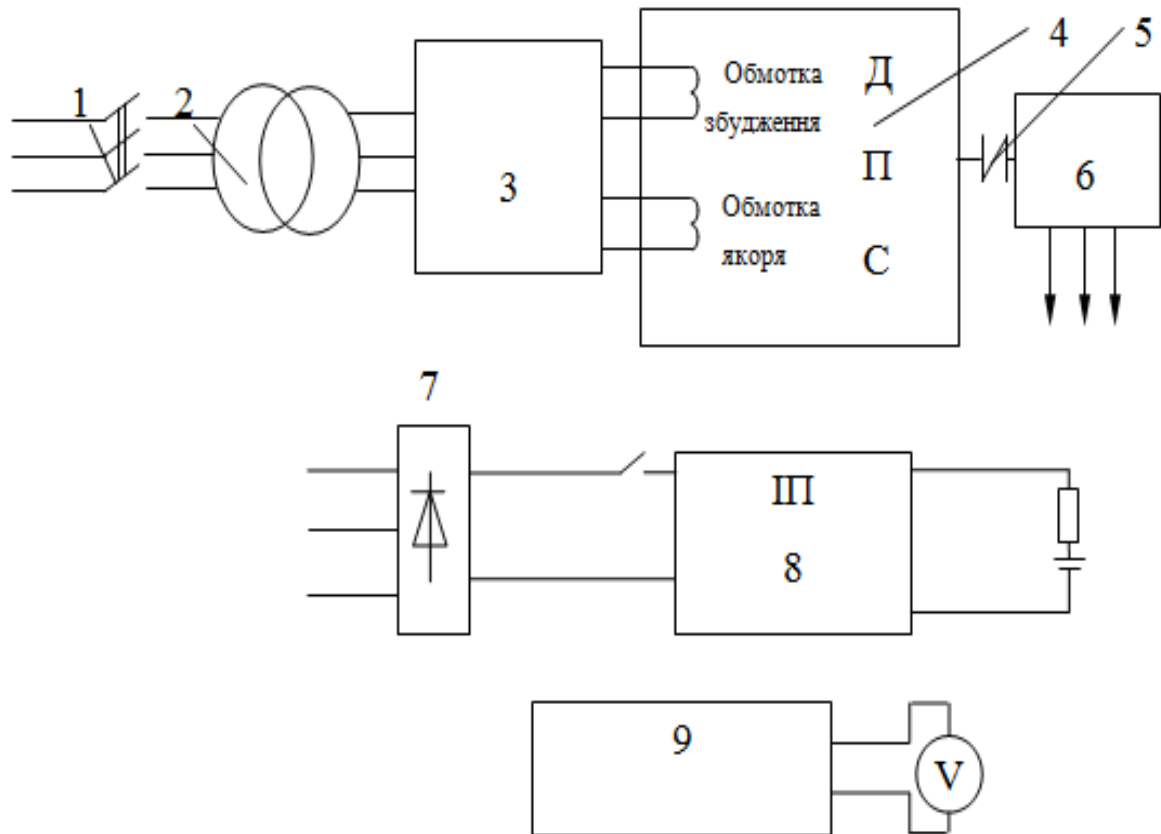


Рис. 4.3. Блок-схема стенду з імпульсним перетворювачем: 1 – ввідний автоматичний вимикач; 2 – трансформатор; 3 – блок керування двигуном постійного струму; 4 – електродвигун постійного струму; 5 – муфта; 6 – електрогенератор; 7 – випрямляч; 8 – імпульсний перетворювач; 9 – вимірювальний комплекс.

Імпульсний перетворювач, як пристрій для зарядження акумуляторних батарей, має оригінальне конструкційне рішення і захищене патентом на корисну модель (№117122).

На рис. 4.4 зображено структурну схему імпульсного перетворювача для зарядження акумуляторних батарей.

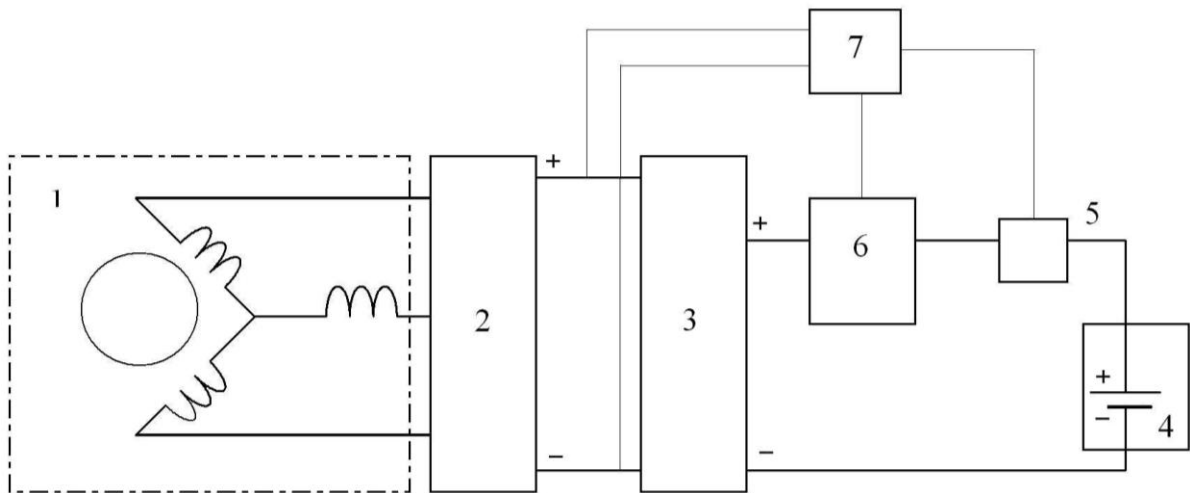


Рис. 4.4. Структурну схему імпульсного перетворювача для заряджання акумуляторних батарей.

Пристрій складається з вітроустановки з трифазним асинхронним генератором 1, випрямляча 2, стабілізатора 3, акумуляторної батареї 4, датчика струму 5, транзисторного ключа 6, системи управління 7.

Пристрій працює таким чином. При роботі трифазного генератора вітроустановки 1 напруга надходить через випрямляч 2 на стабілізатор 3. При цьому не дивлячись на те, що яку б напругу не виробляв генератор вітроустановки 1, в залежності від швидкості вітру, стабілізатор 3 на виході встановлює напругу, необхідну для зарядження АБ 4. Якщо напруга вище необхідної, стабілізатор 3 її понижує, якщо нижче – підвищує, з метою щоб не переривалось зарядження АБ. У той же час, під час роботи пристрою на процес зарядження впливають два фактори (крім зміни величини вхідної напруги) – зміна навантаження на асинхронний генератор і зміна напруги АБ у міру її зарядження.

Зміна навантаження асинхронного генератора, тобто її надмірне збільшення призводить до виходу вітроустановки з генераторного режиму і процес генерації відновлюється тільки після перезапуску агрегату. Неконтрольовані за величиною струми зарядження можуть призводити до перезарядження АБ і її деградації.

Зарядження АБ 4 здійснюється за допомогою транзисторного ключа 6 з широтно-імпульсною модуляцією, система управління якого під'єднана як до

датчика струму 5, так і до виходу випрямляча 2. Змінюючи коефіцієнт заповнення імпульсів транзисторного ключа 6 в залежності від ступеня зарядження акумуляторної батареї 5 і величини вхідної напруги стабілізатора 3, регулюється не тільки струм зарядження, але і рівень навантаження генератора 1. При цьому шпаруватість імпульсів струму зарядження може бути різнитись від одиниці (транзисторний ключ 6 повністю відкритий) до будь-якого мінімального значення тривалості провідного стану транзисторного ключа 6, тобто проводити імпульсне зарядження малими дозами, щоб не перевантажувати асинхронний генератор і запобігти його вихід із генераторного режиму.

На рис. 4.5 та 4.6 наведені результати експериментальних досліджень процесу регулювання шпаруватості імпульсу перетворювача підключеного до вітроелектричної установки з асинхронним генератором.

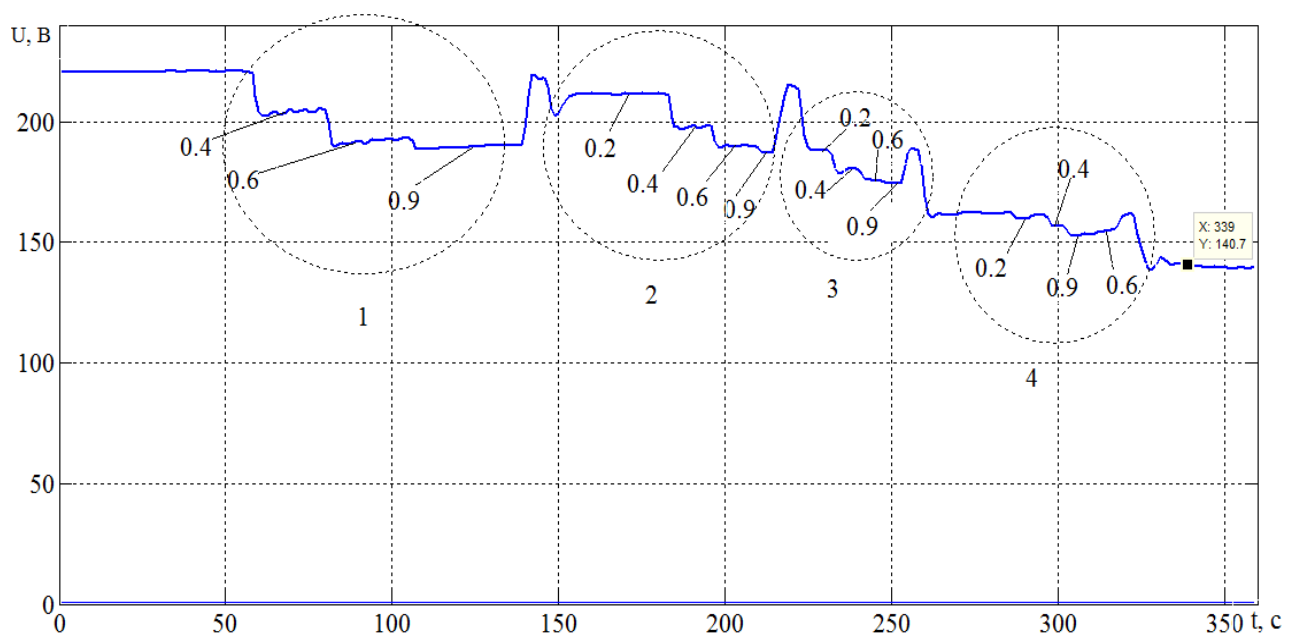


Рис. 4.5. Зміна напруги на затискачах генератора при зміні шпаруватості (від 0,1 до 0,9) та швидкості вітру при швидкості вітру: 1 – v_H , 2 – $0,95 v_H$, 3 – $0,85 v_H$, 4 – $0,75 v_H$.

При досягненні номінальних параметрів напруги на затискачах генератора при холостому ході підключався імпульсний перетворювач для зарядження акумуляторної батареї. У кожному інтервалі заданих рівнів швидкості вітру (1 – v_H , 2 – $0,95 v_H$, 3 – $0,85 v_H$, 4 – $0,75 v_H$) відбувається регулювання шпаруватості імпульсу в межах від 0,1 до максимальної 0,9.

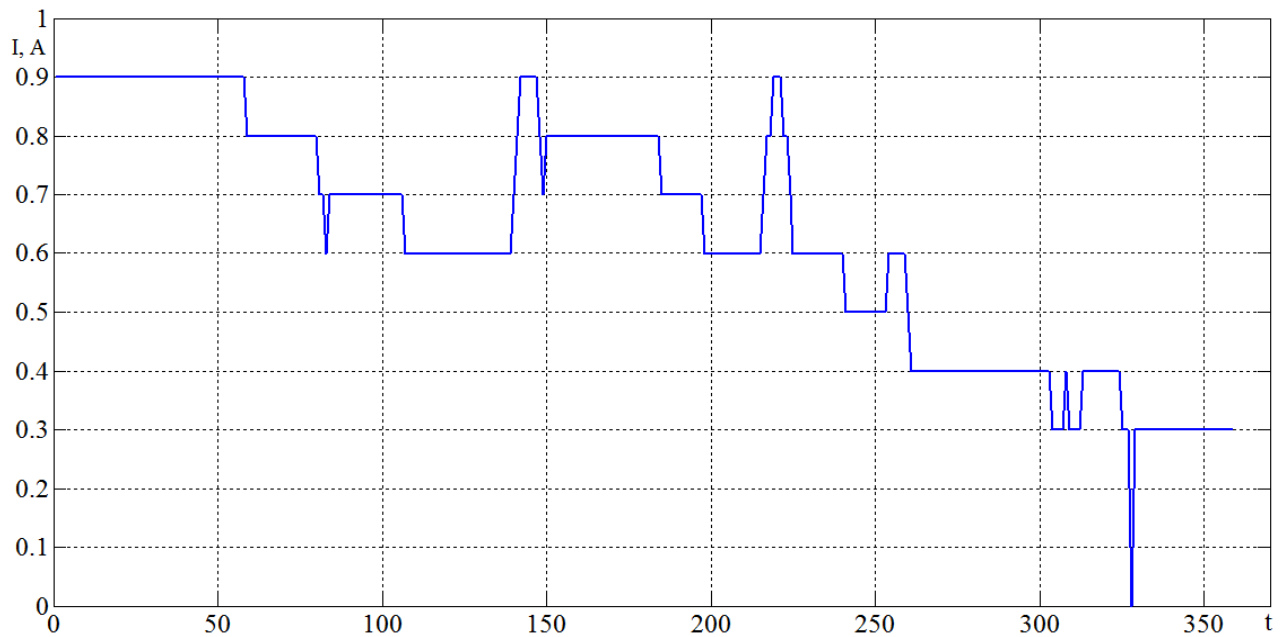


Рис. 4.6. Зміна струму на затискачах генератора при зміні шпаруватості (від 0,1 до 0,9) та швидкості вітру.

Отримані результати експериментальних досліджень та порівняння з результатами імітаційного моделювання при різних регулюваннях шпаруватості імпульсу, наведено на рис. 4.7 – 4.10.

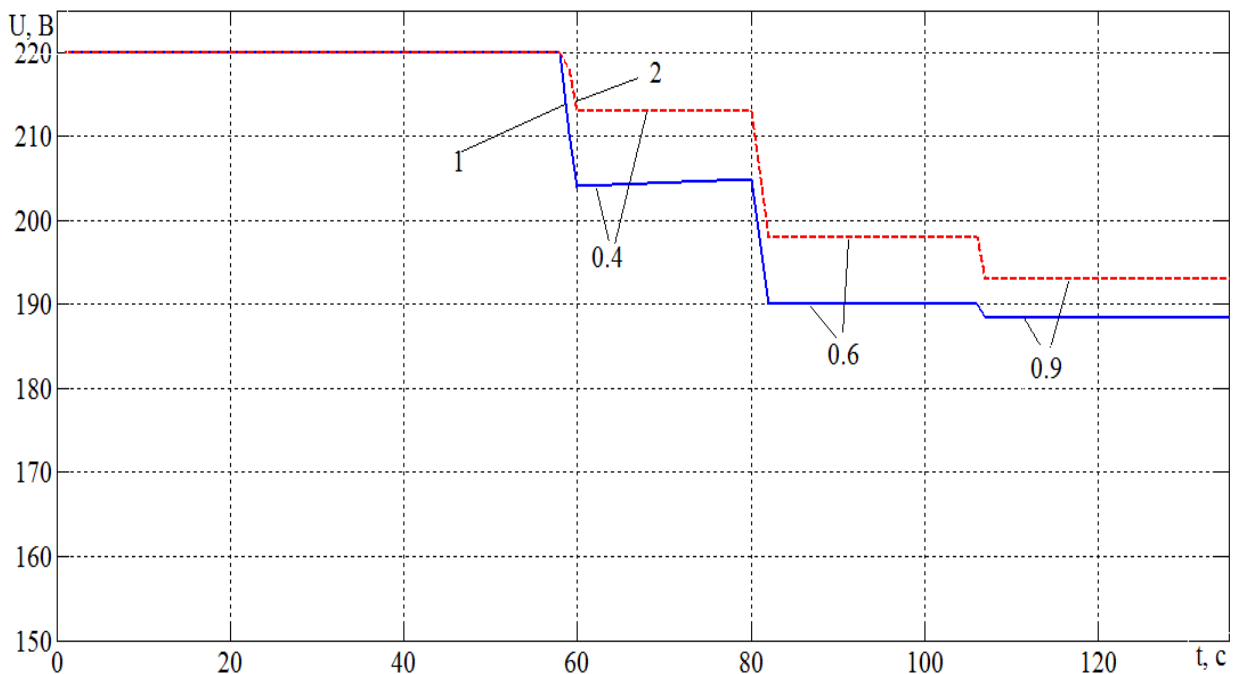


Рис. 4.7. Зміна напруги на затискачах генератора ВЕУ при номінальній швидкості вітру за різної шпаруватості імпульсу (1 – експеримент; 2 – імітаційне моделювання).

На рис.4.7 наведена залежність зміни напруги в часі на виході генератора ВЕУ при значеннях шпаруватості 0,1; 0,4; 0,6; 0,9 та номінальній швидкості вітру. З ростом значення шпаруватості падіння напруги складає до 14 % за експериментальними даними (крива 1), а за результатами моделювання – 12 % (крива 2). Величина розбіжності складає в межах 2 %.

При швидкості вітру 0,95 % від номінального значення (рис.4.8) і при тих же значеннях шпаруватості падіння напруги складає 15% за експериментальними даними (крива 1) і 11% за результатами моделювання (крива 2). Величина розбіжність складає в межах 4 %.

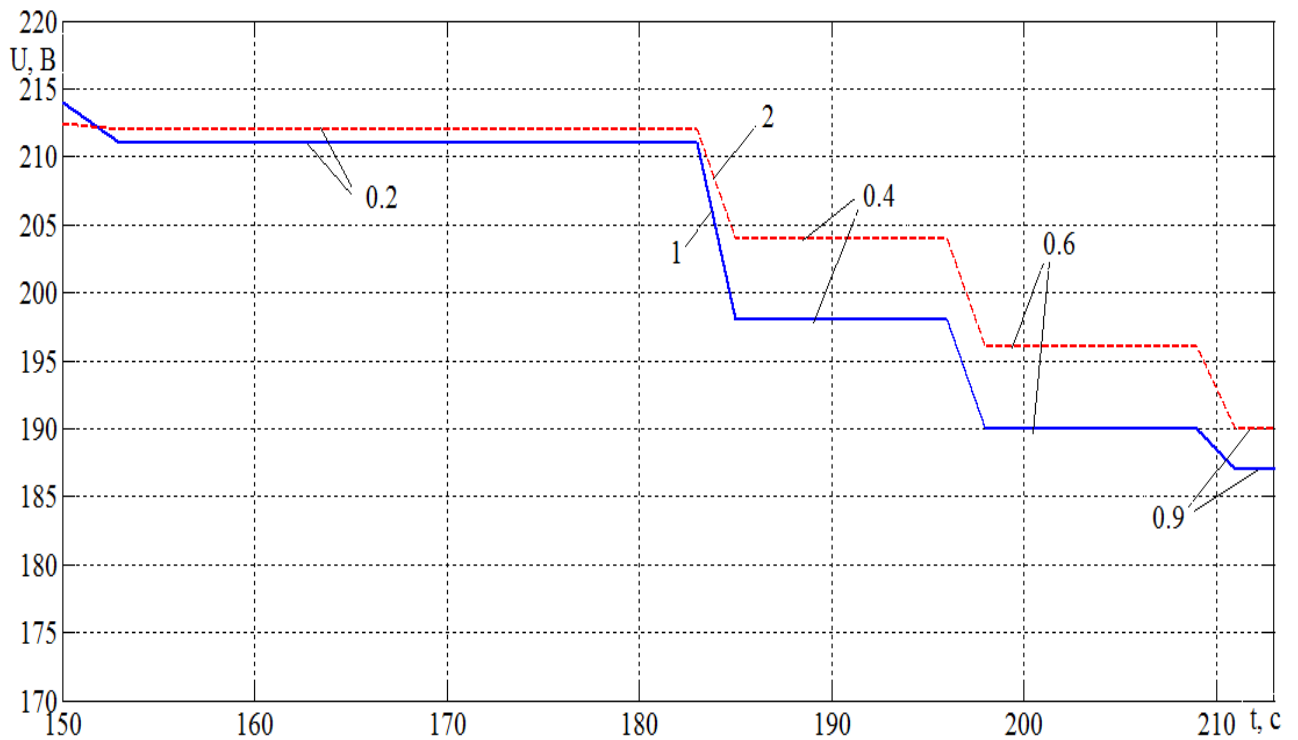


Рис. 4.8. Зміна напруги на затискачах генератора ВЕУ при швидкості вітру 0,95 % від номінальної за різної шпаруватості імпульсу (1 – експеримент; 2 – імітаційне моделювання)

На рис.4.9 наведена залежність зміни напруги в часі на виході генератора ВЕУ при значеннях шпаруватості 0,1; 0,4; 0,6; 0,9. При швидкості вітру 0,85 % від номінального значення (рис.4.9) і при тих же значеннях шпаруватості падіння напруги складає 7 % за експериментальними даними (крива 1) і 9 % за результатами моделювання (крива 2). Величина розбіжність складає в межах 2 %.

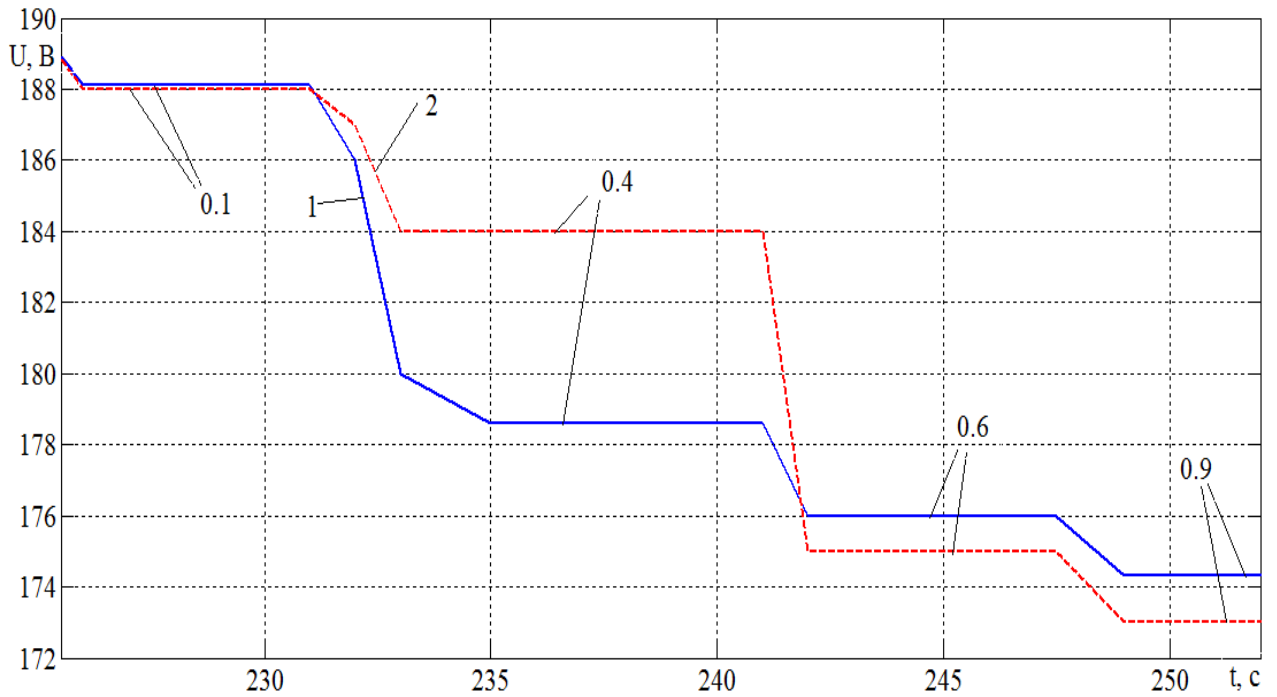


Рис. 4.9. Зміна напруги на затискачах генератора ВЕУ при швидкості вітру 0,85 % від номінальної за різної шпаруватості імпульсу (1 – експеримент; 2 – імітаційне моделювання).

На рис. 4.10 зображена крива 2 при регулюванні шпаруватості імпульсу від 0,1 до максимальної 0,9, коли напруга падає до 4 % від номінальної напруги, що отримана на затискачах при зміні швидкості вітру.

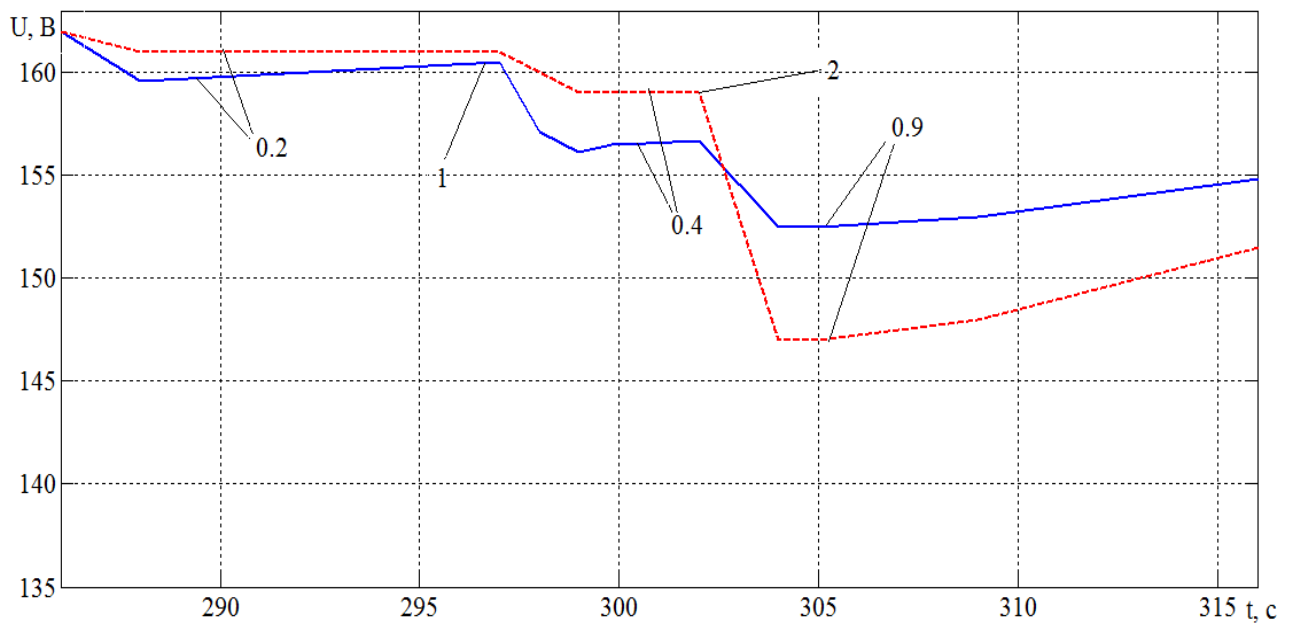


Рис. 4.10. Зміна напруги на затискачах генератора ВЕУ при швидкості вітру 0,75 % від номінальної за різної шпаруватості імпульсу (1 – експеримент; 2 – імітаційне моделювання).

При швидкості вітру 0,75 (рис. 4.10) від номінального значення і при шпаруватості від 0,2 до 0,9 падіння напруги за експериментальними даними складає 6 %, а за результатами моделювання 9 %. Величина розбіжність складає в межах 3 %. Слід відмітити вплив інерційності ротора ВЕУ після перехідного процесу у вигляді підйому кривої напруги під час прикладення імпульсів різної шпаруватості.

4.4. Висновки за розділом

1. Проведені стендові дослідження роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором підтвердили теоретичні дослідження роботи. Величина розбіжності складає в межах 7 %.

2. Порівняльний аналіз експериментальних результатів та тих, що отримані моделюванням, показує, що при зміні шпаруватості від 0,2 до 0,9 асинхронна машина не втрачає генераторний режим при зміні швидкості вітру в діапазоні 0,95 % – 0,75 % від номінального значення, а величина розбіжності результатів складає 2...4 %.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання, що полягає в розвитку наукового підходу до визначення режимів роботи автономних вітроелектроустановок з асинхронним генератором за умов її стійкості та змінних частот обертання ротора вітроустановки та параметрів навантаження на базі імітаційного моделювання, що мають суттєве значення для розробки та проектування вітроенергетичного обладнання, яке буде застосоване за метеорологічних умов республіки Еквадор.

Виконані теоретичні та експериментальні дослідження дозволили зробити наступні висновки:

1. Оцінка вітроенергетичного потенціалу республіки Еквадор показала, що найбільш придатними районами використання вітроелектричних установок є гірські райони, де середньорічна швидкість вітру на висоті 20 м складає 4,3 – 7,3 м/с, а питома потужність вітрового потоку 33,4 – 167,6 Вт/м².

2. Обґрунтовані структурні схеми вітроелектричної установки на базі асинхронного генератора, що вказують на необхідність застосування двоканальних схем для підвищення коефіцієнта заповнення графіка навантаження споживача.

3. Розроблена математична модель системи «вітроагрегат – асинхронний генератор – споживач» та проведено її аналіз на базі критерію Гурвиця, що дозволив визначити характер протікання динамічних процесів, які впливають на її стійкість за умови зміни швидкості вітру.

4. Проведено аналіз режимів роботи автономної вітроелектричної установки при постійній та змінній швидкості вітру на базі імітаційного моделювання. Встановлено, що послідовне приєднання навантаження повинно поводитися з витримкою часу для проходження перехідного процесу з приєднанням блоку конденсаторів відповідної ємності.

5. Проведено аналіз режимів роботи автономної вітроелектричної установки при застосуванні імпульсного перетворювача для зарядження акумуляторних батарей на базі імітаційного моделювання. Встановлено, що під

час регулювання шпаруватості сигналу від 0,1 до 0,9 можливе максимальне використання енергії вітру, що перетворюється асинхронним генератором.

6. Розроблено стенд для дослідження режимів роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором, що дало можливість провести дослідження процесу стабілізації напруги на затискачах генератора та впливу величини шпаруватості імпульсу перетворювача для зарядження акумуляторних батарей на вихідні показники генератора вітроустановки за різних значень швидкості вітру. Величина розбіжності за результатами імітаційного моделювання склала в межах 7 %.

7. Порівняльний аналіз експериментальних результатів та тих, що отримані моделюванням, показує, що при зміні шпаруватості від 0,2 до 0,9 асинхронна машина не втрачає генераторний режим при зміні швидкості вітру в діапазоні 0,95 – 0,75 % від номінального значення. Розбіжність значень, що отримані експериментальним шляхом і за моделлю, складає від 2 до 4 %, що свідчить про адекватність моделі.

8. Результати досліджень використані в Інституті відновлюваної енергетики НАН України в рамках виконання науково-дослідної роботи та в навчальному процесі і наукових дослідженнях кафедри електропостачання ім. проф. В.М.Синькова ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. J. D. Pitteloud, S. Gsanger. Small wind world report. Worl Wind Energy Association. Bon. 2016.
2. Plan maestro de electrificación 2013–2022 [Recurso electronico]: Ministerio de regulación y control ARCONEL. – Quito. – 2013. №1. – С. 100. – Disponible : <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/vol1-Resumen-Ejecutivo-PME-2013-2022.pdf>
3. Proyecto eólico Isla San Cristobal - Galápagos [Recurso electronico]. – Disponible:[http://www.globalelectricity.org/upload/File/final_spanish_galapagos_report_2016\(1\).pdf](http://www.globalelectricity.org/upload/File/final_spanish_galapagos_report_2016(1).pdf)
4. San Cristobal Wind Project Galapagos Islands: [Electronic resource] / A. Neville // Power Business and Technology for the global generation industry since 1882. – 2008. – №. 3. – Available from: <http://www.powermag.com/top-plants-san-cristobal-wind-project-galapagos-islands-ecuador/?printmode=1>
5. Energía renovable para Galápagos [Recurso electronico]: R. Valdés, A. Mosquera / Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. – Quito. – 2007. – Disponible:http://www.ec.undp.org/content/dam/ecuador/docs/documentos%20proyectos%20ambiente/pnud_ec%20REVISTA%20ENERGIA%20VERDE%20PARA%20GALAPAGOS-ilovepdf-compressed.pdf
6. Alternativas de construcción de un parque eólico para suministro energético en Santa Cruz [Recurso electronico]: L. Zaragocín, C. Jácome // ERGAL. – Quito. – 2010. – Disponible: http://fier.olade.org/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=13650&shelfbrowse_itemnumber=14390
7. Сандовал З.К. Аналіз потоків енергії вітру республіки Еквадор / З.К. Сандовал // Відновлювана енергетика. – 2015. – № 3. – С. 48–52.
8. Bravo D. Implementación de proyectos de generación eólica en el Ecuador: t. ing. electrico: Bravo Figueroa Diego David. – Q., 2005. – 148с. – Disponible: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5944>
9. Pelaez M. R. Energias renovables en Ecuador–situacion actual, tendencias y perspectivas / M. R. Pelaez, J.L. Espinoza. – Cue.: Graficas Hernandez, 2015. – 424 P.

10. Atlas eólico del Ecuador [Recurso electrónico]: Ministerio de electricidad y energía renovable. – Quito. – 2013.
11. Anuario Meteorológico [Recurso electrónico]: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. – Quito. – 2011. – No. 5. – Disponible:
12. Corporación para la investigación energética [Recurso electrónico]. – Disponible: <http://www.energia.org.ec/cie/?cat=7>. – Energía eólica. – (Fecha de revisión: 10.04.2016).
13. Taller sobre energía eólica [Recurso electrónico]: J. Aguirre // INER. – Loja. – 2013. – Disponible:
14. El futuro proyecto eólico del país [Recurso electrónico]: INP // Revista del instituto nacional de preinversión. -2015. – No.1.-P.7-14.
15. Análisis de Proyectos de Energía Limpia con Software RETScreen [Recurso electrónico]: RETScreen International-Minister of Natural Resources Canada 2001-2005. – Disponible: http://www.retscreen.net/es/t_training.php
16. Plan maestro de electrificación 2013–2022 [Recurso electrónico]: Ministerio de regulación y control ARCONEL. – Quito. – 2013. – Disponible: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/Vol3-Perspectiva-y-expansi%C3%B3n-del-sistema-el%C3%A9ctrico-ecuadoriano.pdf>
17. Regulación No. CONELEC–004/11 [Recurso electrónico]: Agencia de Regulación y control de electricidad. – Quito. – 2011. – Disponible: http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/10/CONELEC_004_11_ERNC.pdf
18. Regulación No. CONELEC–001/13 [Recurso electrónico]: Agencia de Regulación y control de electricidad. – Quito. – 2013. – Disponible: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/regulaciones/>
19. Plan maestro de Electrificación 2013–2022 [Recurso electrónico]: Державний інститут Еквадору ARCONEL. – Quito. – 2013. – Disponible: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/Vol3-Perspectiva-y-expansi%C3%B3n-del-sistema-el%C3%A9ctrico-ecuadoriano.pdf>

20. Análisis del comportamiento de un parque eólico en condiciones extremas-Proyecto PIC-13-INER-004 [Recurso electrónico]: G. Guerron / Instituto nacional de eficiencia energética y energías renovables. – Quito. – 2013. – P. 25. – Disponible: http://www.iner.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/09/Informe-t%C3%A9cnico-final-de-proyecto_E%C3%B3lica.pdf
21. Agenda nacional de energía 2016-2040 [Recurso electrónico]: Ministerio coordinador de sectores estratégicos. – Quito. – 2016. – 80. C. – Disponible: <http://www.sectoresestrategicos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/10/AGENDA-DE-ENERGIA-2016-2040-vf.pdf>
22. Atlas sector eléctrico ecuatoriano 2014 [autor del texto ARCONEL]. – Quito.: ARCONEL, 2015. – P. 140.
23. Proyecciones referenciales de población a nivel parroquial 2010-2020 [Recurso electrónico]: SENPLADES. – Режим досту Disponible: <http://sni.gob.ec/proyecciones-y-estudios-demograficos>.
24. Consumo per capita 2005-2014 [Recurso electrónico]: ARCONEL. – Disponible: <http://www.regulacioneolica.gob.ec/estadistica-del-sector-electrico/recaudacion-anual/>
25. Plan maestro de Electrificación [Recurso electrónico]: Державни інститут Еквадору CONELEC. – Quito. – 2009. – С. 506. – Disponible: <http://www.regulacioneolica.gob.ec/plan-maestro-de-electrificacion-2009-2020/>
26. Stiebler M. Wind Energy Systems for Electric Power Generation / M. . Stiebler. – Heidelberg: Springer, 2008. – P. 201.
27. Ion B. Resilient Energy Systems Renewables: Wind, Solar, Hidro / B. Ion, V.D. Gherghe. – NY.: Springer, 2013. – P. 517.
28. Plan maestro de electrificación 2012 – 2021 [Online]: ARCONEL. – Quito. – 2012. – P. 448. – Available: <http://www.regulacioneolica.gob.ec/wp-content/uploads/downloadds/2015/12/PME-2012-2021.pdf>
29. Cobertura anual 2005-2014 [Online]: ARCONEL. – Available: <http://www.regulacioneolica.gob.ec/estadistica-del-sector-electrico/produccion-anual-2/>

30. Григораш О.В. Современное состояние и перспективы применения асинхронных генераторов в автономной энергетике / О.В. Григораш // Промышленная энергетика.– 1995.– №3. – С.29-32.

31. Фришман В.С. Проектирование автономных источников переменного тока / В.С. Фришман, Г.А. Прохорова, С.З. Эвентов // Электротехника. –1988.– №1. – С.20-25.

32. Радин В.И. Применение асинхронных генераторов как автономных источников переменного тока / В.И. Радин В.А. Винокуров, В.С. Аскерко // Электротехника. –1968.– №8. –С.17-20.

33. Костырев М.Л. Асинхронные генераторы в составе микрогидроэлектростанций / М.Л. Костырев, А.Н. Штанов, Н.В. Мотовилов, А.С. Тупиков, С.К. Желоховцев // Электротехника.– 1990.– С. 18-22.

34. Лежнюк П.Д. Компенсація реактивної потужності асинхронних генераторів на малих гідроелектростанціях / П.Д. Лежнюк, О.В. Нікіторович, Нгома Жак-П'єр // Наукові праці ВНТУ. Енергетика та електротехніка. 2008. – № 2. – С.1-6.

35. J. A. Barrado, R. Grino and H. Valderrama, "Standalone Self-Excited Induction Generator with a Three-Phase Four-Wire Active Filter and Energy Storage System," 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vigo, 2007, pp. 600-605.

36. D. Swati, S.V. Jayaram. Desing of Excitation Capacitance for Self-Excited Induction Generator / International journal of computer science and communication network.- Vol. 1.- № 3.- PP. 264-269.web: <http://www.ijcscn.com/Documents/Volumes/vol1issue3/ijcscn2011010311.pdf>

37. Dalei J. A novel method to determine minimum capacitance of the self-excited induction generator / J. Dalei, K. B. Mohanty // Students' Technology Symposium, (Kharagpur , 2014). – 2014. – Kharagpur. – P. 408-413.

38. Ahmed T. Performance evaluations of three-phase self-excited induction generator with variable-speed wind turbine and minimum required capacitance / T. Ahmed, S. Moisseev, E. Hiraki, M. Nakaoka // Power Electronics and Drive Systems, (PEDS, 2003). – 2003. – Vol.1. – P. 754-759.

39. Платиха О.Г. Математичне моделювання автономного джерела на базі асинхронного генератора з самозбудженням і тиристорного регулятора напруги / О.Г. Платиха, А.С. Куцик, Б.Л. Копчак // Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2001. – № 418.

40. Мазуренко Л.И., Лесник В.А., Дынник Л.Н., Джура А.В. Асинхронный генератор для автономных гидроэлектростанций малой мощности с нерегулируемыми гидротурбинами // «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика» Сборник научных трудов Днепропетровского государственного технического университета. <http://paep2007.abacus.ua/default.aspx>.

41. Копылов И.П. Математическое моделирование асинхронных машин / И.П. Копылов, Ф.А. Мамедов, В.Я. Беспалов. – М.: Энергия, 1969. – 354с.

42. S. Hammadi. DTC SEIG drive scheme for an isolated wind turbine buck system / S. Hammadi, N. A. Hidouri, L. Sbita // Control, Decision and Information Technologies, (Hammamet, 2013). – 2013. – Hammamet. – P. 543-548.

43. Mayurappriyan P. S. Intelligent controller for an isolated wind energy conversion scheme / P. S. Mayurappriyan, K. Rajambal, C. Chellamuthu, J. Jerome // India International Conference on Power Electronics, (Chennai, 2006). – 2006. – Chennai. – P. 83-88.

44. Бохян С.К. Емкостное самовозбуждение асинхронного генератора. // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. –1977.- №2. –С.39-45.

45. Ashish kumar Swain, Sushanta kumar senapati “An Experimental Investigation of Self-Excitation in Stand-alone Induction Generator”

46. Eltamaly A. M. New formula to determine the minimum capacitance required for self-excited induction generator / A. M. Eltamaly // Power Electronics Specialists Conference, (IEEE 33rd Annual, 2002). – 2002. – vol.1. – P. 106-110.

47. Ткачук В.І. Асинхронний генератор з самозбудженням як ланка системи автоматичного керування / В.І. Ткачук, Б.Л. Копчак // Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2002. – №449.

48. Новиков А.В. Емкостное самовозбуждение асинхронного генератора / А.В. Новиков, С.Г. Корегиан // Изв. ВУЗ. Электромеханика. – 1967. – №2. – С.173-179.

49. Дженжубаев А-З.Р. Стабилизация напряжения автономного асинхронного генератора путем использования электроприемников с индивидуальными конденсаторами / А-З.Р Дженжубаев // Электротехника. 2001. – №7. – С.30-33.

50. Балагуров В.А. Построение внешних характеристик асинхронного генератора / В.А. Балагуров, А.А. Кецерис, В.В. Лохнин // Электротехника. – 1974. – №2. – С. 24-26.

51. Henry G. Características de las precipitaciones, la temperatura del aire y los vientos en la costa ecuatoriana / G. Henry, Juan Regalado // Acta Oceanografica del Pacifico. – 2007. – Vol. 14. – No.1. – P.

52. Кудря С.О. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії: навч. посіб. / С.О. Кудря, В.М. Головка. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 184с.

53. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки / Е.М. Фатеев.-М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1948. – 544 с.

54. Gary L. Wind Energy Systems / L. Gary. – Manhattan KS.: Electronic edition, 2006. – P. 446.

55. Головка В.М. Вітроенергетика / В.М. Головка. – К.: курс лекцій КПІ, 2010. – 87 с.

56. Попов А.Ю. Автономный источник электроэнергии ветроэлектрической установки / А.Ю Попов // Международный научный журнал Инновационная Наука. – 2015. – № 10. – С. 2410–6070.

57. Мазуренко Л.И. Асинхронные генераторы с вентильным и вентильно-емкостным возбуждением для автономных энергоустановок / Л.И. Мазуренко, А.И. Лищенко. – К.: Наукова думка, 2011. – 271 с.

58. Мазуренко Л.І. Математична модель асинхронного генератора з вентильним збудженням з використанням методу припасовування / Л.І.

Мазуренко, В.І. Романенко // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 4. – С. 19–24.

59. Головка В.М. Аналіз компоновки автономних вітроелектричних систем з асинхронним генератором / В. М. Головка, В.П. Коханевич, М.О. Шихайлов, Т.В. Зінченко, З.К. Сандовал // Відновлювана енергетика. – 2015. – № 43. – С. 37–40.

60. Головка В.М. Робота вітроенергетичних установок автономному режимі / В.М. Головка, М.О. Шихайлов // Відновлювана енергетика. – 2007. – № 1. – С. 55–57.

61. Васько П.Ф, Пекур П.П. Електромеханічна стала часу вітроелектричних установок з асинхронними генераторами в навантажувальних режимах роботи / П.Ф Васько, Пекур П.П // Відновлювана енергетика. – 2006. – № 2. – С. 70 – 76.

62. Seyoum D. Dynamic Stability Analysis of Induction Generators / D. Seyoum, Nasser Hosseinzadeh, Peter Wolfs // Australasian Universities Power Engineering Conference, (Saha, Sep-26, 2004). – 2004. – Saha. – P. 137.

63. Головка В.М. Стійкість автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором / В.М. Головка, К. Сандовал // Енергетика та електрифікація. – 2017. – № 3. – С. 20 – 21.

64. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування / М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. – К.: Либідь, 1997. – 544 с.

65. Documentation Math work [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/windturbine.html>. – wind Turbine. – (Дата обращения: 10.04.2016).

66. Burton T. Wind Energy Handbook / T. Burton et al. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2001. – P. 642.

67. Sloomweng, J.G. Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator / J.G. Sloomweng, H. Polinder, W.L. Kling // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. – 2001. – P. 644–649.

68. Олейников А.М. Математическое моделирование режимов работы автономной ветроэлектрической установки с асинхронным генератором малой

мощности / А.М. Олейников, Л.Н. Канов, М.С. Мирошниченко // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. - 2013. - Вип. 36. – С. 18–24. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PIED_2013_36_5.

69. Зачепа Ю.В. Автономные системы электроснабжения на базе асинхронных генераторов, основные требования и структура/ Ю.В. Зачепа // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2010. – Вип. 2. – С. 32 – 40.

70. Siegfried H. Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems / H. Siegfried. – Kassel: John Wiley & Sons Ltd, 1998. – P. 511.

71. Godoy Simoes M. Modeling and Analysis with Induction Generators / M. Simoes Godoy, Felix A. Farret. – NY.: CRC Press, 2015. – P. 435.

72. Araújo R.E. Induction motors-Modelling and Control / R.E. Araújo. – Rijeka: InTech, 2012. – P. 558.

73. Mohan N. Advanced Electric Drives: Analysis, Control, and Modelling Using MATLAB-Simulink / N. Mohan. – H.: John Wiley & Sons Inc, 2014. – P. 199.

74. Documentation Math work [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/asynchronousmachine.html>. – Asynchronous machine. – (Дата обращения: 10.04.2016).

75. Boldea I. Electric Machines Steady State Transients and Design with Matlab / I. Boldea, L. Tutelea. – Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2010. – P. 800.

76. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives / B.K. Bose. – NJ.: Prentice hall, 2002. – P. 711.

77. Ivon F. Comparative study of different implementations for induction machine model in Matlab-Simulink for wind turbine simulations / F. Ivon, F. Blaabjergg, A.D. Hansen, Z. Chen // IEE Workshop on Computers in Power Electronics. – 2002. – P. 58-63.

78. Krause P.C. Analysis of electric machinery and drive systems / P.C. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff. – New York: MacGraw-Hill, 2002. – P. 632.

79. Chee-Mun Ong. Dynamic simulation of electric machinery using MATLAB-Simulink / Ong Chee-Mun. – NJ.: Prentice Hall PTR, 1997. – P. 643.

80. Perelmuter V.M. Renewable energy systems-Simulation with Simulink and SymPowerSystems / V.M. Perelmuter. – Boca Raton: Taylor & Francis, 2017. – P. 464.

81. Ченчевой В.В. Анализ пусковых режимов асинхронного двигателя при питании от автономного источника на базе асинхронного генератора / В.В. Ченчевой, Ю.В. Зачепа, Г.Ю. Рыков, А.О. Колотий // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – 2009. – №4. – С. 30 – 35.

82. Лищенко А.И. Асинхронные машины с массивным ферромагнитным ротором / А.И. Лищенко, В.А. Лесник. – К.: Наукова думка, 1984. – 168 с.

83. Tariq M. Simulink based modeling, analysis and simulation of self excited induction generator for use in remote areas / M. Tariq, S. Yuvarajan // IU-JEEE. – 2013. – Vol. 13. – No.1. – P. 1623 – 1628.

84. T.Tilak. Modeling of a Stand-alone induction generator on load using Matlab Simulink / Tilak T, Gupta S.K // JETEAS. – 2012. – Vol.3. – No. 4. – P.729-733.

85. K.Trinadha. Sutdy of wind turbine based SEIG under balanced/unbalanced loads and excitation / Trinadha k, Kumar A, Sandhu K.S // IJECE. – 2012. – Vol.2. – No.3. – P.353 – 370.

86. Jose Antonio Barrado. El generador de inducción autoexcitado. / Barrado Jose Antonio. – Barcelona: Marcombo, 2011. – P. 230.

87. Abbau A. Capacitance required analysis for Self-excited Induction generator / A. Abbau, M. Barara // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – Vol. 55. – No. 3. – С. 382 – 389.

88. Boora S. On-set Theory of Self-excited Induction Generator / S. Boora // International Journal of Recent Trends in Engineering. – 2009. – Vol. 2. – No. 5. – P. 325 – 330.

89. Sunil K.G. Analysis of performance parameters and estimation of optimum capacitance for asynchronous generator / K.G. Sunil, D.K. Palwalia // Engineering science and technology and international journal. – 2016. – Vol.19. – No. 4. – P.1753 – 1762.

90. Chakraborty C. Excitation requirements for standalone three phase induction generator / C. Chakraborty, S.N. Bhadra, A.K. Chattopadhyay // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1998. – Vol.13. – No. 4. – P. 358 – 365.

91. Radic M. Critical speed-capacitance requirements for self-excited induction generator / M. Radic, Z. Stajic, D. Arnautovic // Automatic Control and Robotics. – 2009. – Vol. 8. – No. 1. – P. 165 – 172.

92. Kumar R.T. A Reliable and Accurate Calculation of Excitation Capacitance Value for an Induction Generator Based on Interval Computation Technique / R.T. Kumar, V. Agarwal, P.S.V. Nataraj // International Journal of Automation and Computing. – 2011. – Vol. 8. – No. 4. – P. 429 – 436.

93. Зачепа Ю.В. Анализ систем компенсации реактивной мощности в условиях автономных генераторных установках / Ю.В. Зачепа, Т. С. Василькова // Електромех. і енергозберігаючі системи. – 2010. – Вип. 4. – С. 71 – 72.

94. Торопцев Н. Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок / Н. Торопцев. – М.: НТФ «Электропрогресс». – 2004. – 88 с.

95. Al Jabri A.K. Capacitance requirement for isolated self-excited induction generator / A.K. Al Jabri, A.I. Alolah // IEE Proceeding B – Electric Power Applications. – 1990. – Vol. 137. – No.3. – P. 154–159.

96. Bassett E.D. Capacitive excitation for induction generators / E.D. Bassett, F.M. Potter // AIEE Trans. Elect. Eng. – 1935. – Vol. 54. – P. 540–544. doi: 10.1109/EE.1935.6540048

97. Chan T. F. Capacitance requirements of self-excited induction generators / T.F. Chan // IEEE Trans. Energy Conversion. – 1993. – Vol. 8. – P. 304–311.

98. Головки В.М. Имитационная модель для анализа параметров автономных ветроэлектрических установок с асинхронным генератором / В.М. Головки, В.П. Коханевич, Н.А. Шихайлов, К. Сандовал, А.М. Донец // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2017. – vol.4. – № 6. – С. 42–52. DOI:10.15518/isjaee.2017.04-06.042-052

99. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы: Учебник / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Явковлев. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. Ун-т, 2003. – 400 с.

100. Raina G. Wind energy conversion using a self-excited induction generators / G. Raina, O.P. Malik // IEE Proc. – 1982. – No. 6. – P. 260–265.

101. Khaled S. Sakkoury, Safaa Emara. Analysis of wind driven self-excited induction generator supplying isolated DC loads / S. Khaled, Safaa Emara Sakkoury / Journal of electrical systems and information technology. – 2016. – No. . – P.

102. Vellapatchi Nayanar, Natarajan Kumaresan. Wind driven SEIG supplying DC microgrid through a single-stage power converter / Nayanar Vellapatchi, Kumaresan Natarajan // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2016. – No. . – P.

103. Suresh K. Design and implementation of bi-directional dc-dc converter for wind energy system / K. Suresh, R. Arulmozhiyal // Circuits and Systems. – 2016. – No. . – P. 3705–3722.

104. Пушкар М.В. Регулювання напруги асинхронних генераторів з самозбудженням за допомогою сімісторно-комутованої конденсаторної батареї / М.В. Пушкар, С.О. Бур'ян, В.В Михайленко // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2014. – Вип. 39. – С. 52–56. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PIED_2014_39_11

105. Кудря С.О. Дослідження роботи зарядного пристрою акумуляторної батареї від вітроагрегату / С.О. Кудря, В.І. Будько, В.Б. Павлов, А.В. Попов, В.Є. Павленко // Відновлювана енергетика. – 2010. – № 4. – С. 5–10.

106. Сенько В.І. Електроніка і мікросхемотехніка: Нав. посібник / В.І. Сенько, М.В. Панасенко. – К.: Каравела, 2012. – 640 с. – (Книга 1; Т. 4).

107. Erickson W.R. Fundamentals of Power Electronics-Second Edition / W.R. Erickson, D. Maksimovic. – NJ.: Kluwer Academic Publishers, 2000. – P. 883.

108. Головка В.М. Аналіз режимів роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором з використанням імпульсного пристрою

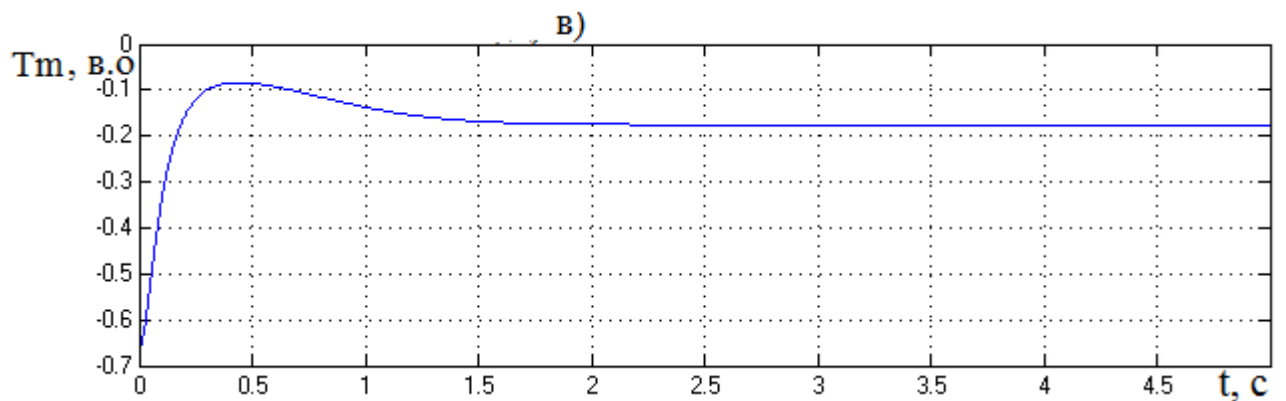
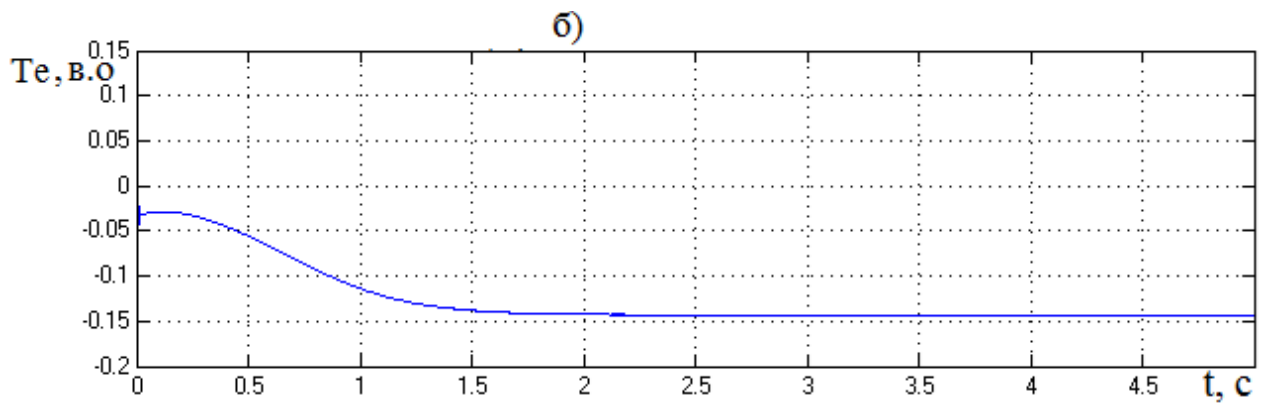
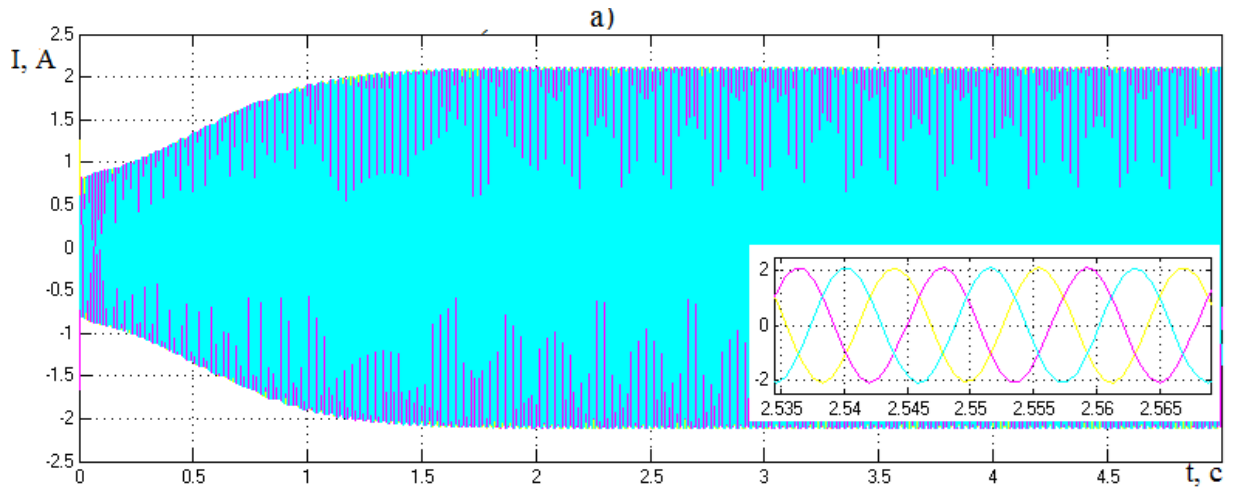
для зарядження акумуляторних батарей на базі імітаційного моделювання / В.М. Головка, В.П. Коханевич, М.О. Шихайлов, К.Сандовал // Відновлювана енергетика.- 2017.- № . – С. 63–74.

109. Головка В.М. Порівняльний аналіз експериментальних та результатів імітаційного моделювання роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором з використанням імпульсного пристрою для зарядження акумуляторних батарей / В.М. Головка, К.Сандовал // Енергетика і автоматика. – 2017. – № 2 (32). – С. 153–160. – Режим доступу до журн.: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/8781>

ДОДАТКИ

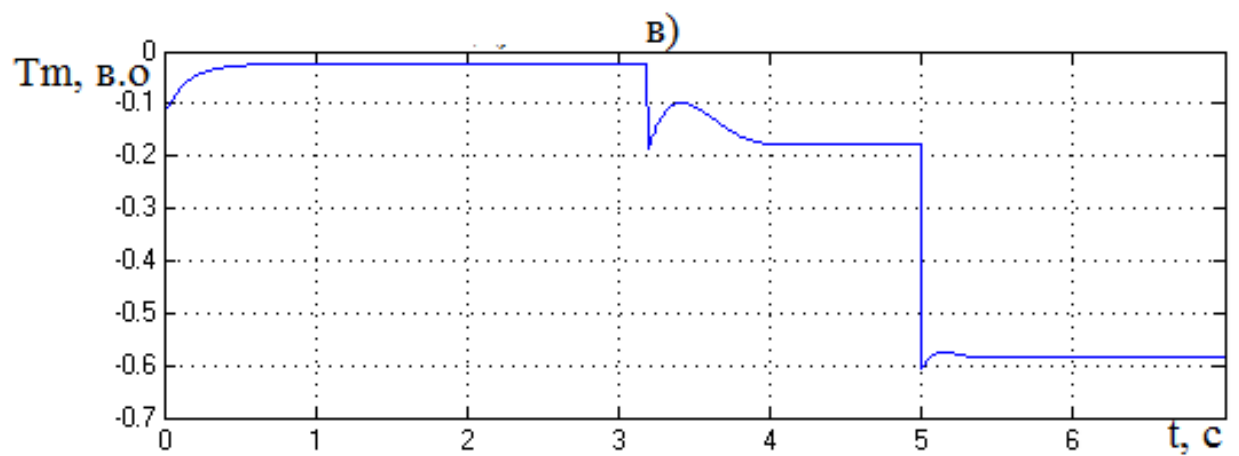
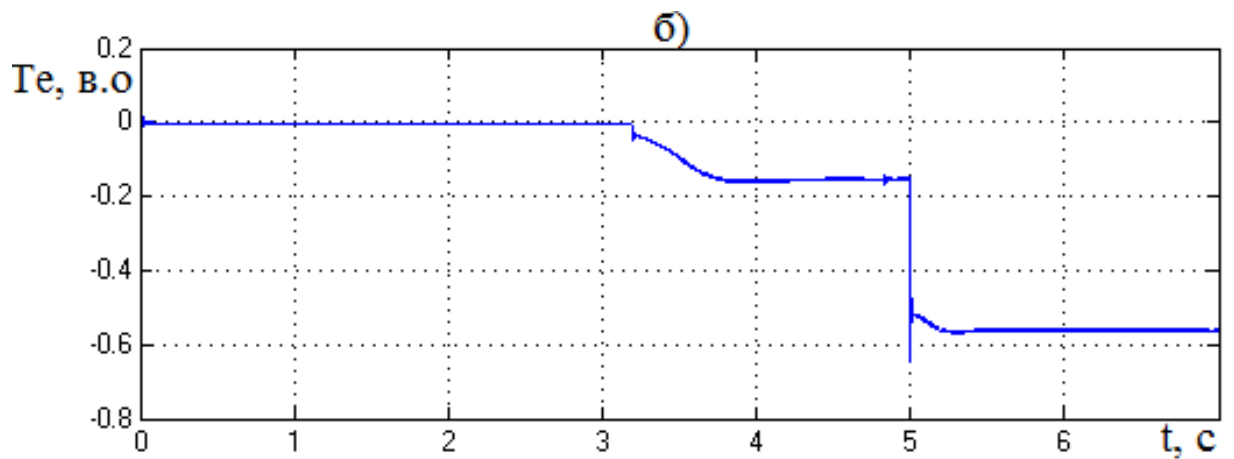
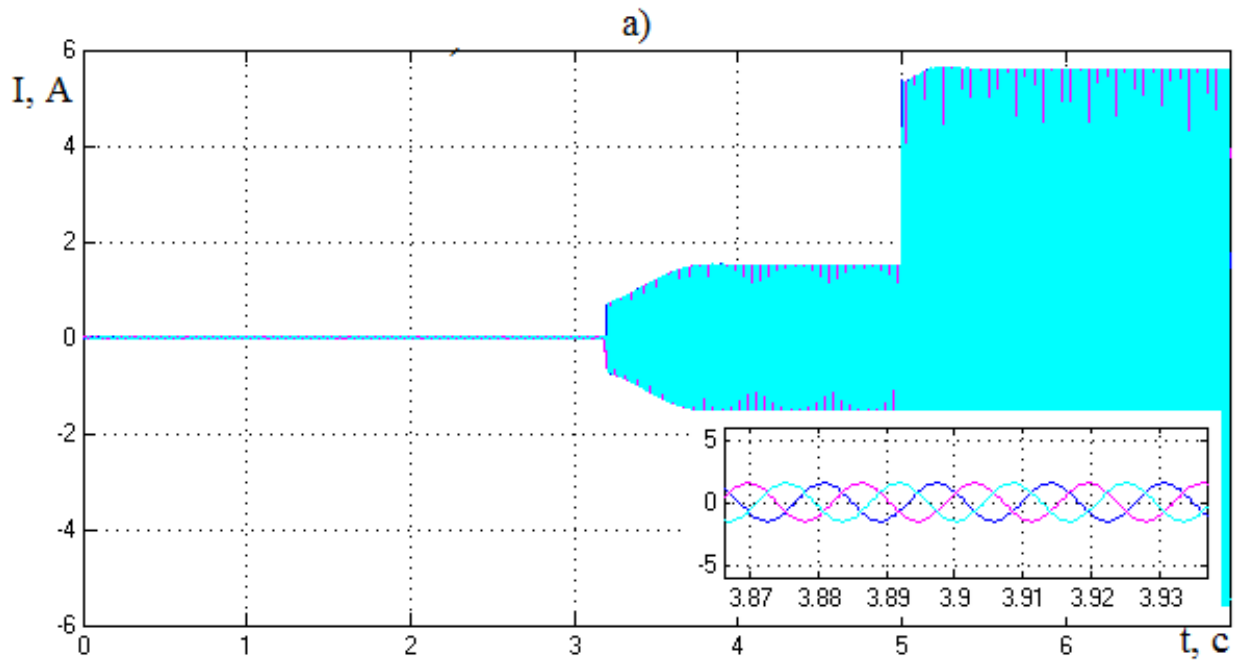
ДОДАТОК А

При пуску вітроелектричної установки. Характеристики АГ: а) струм навантаження ; б) електромагнітний момент; д) механічний момент.



ДОДАТОК Б

Характеристики ВЕУ з АГ при зміні швидкості вітру: а) струм навантаження; б) електромагнітний момент; в) механічний момент.



ДОДАТОК В

Характеристики ВЕУ з АГ після приєднання кількох споживачів: а) струм навантаження; б) електромагнітний момент; в) механічний момент. При різних підключення навантажень.

