

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ГЕНЕРАТОРНИМ АГРЕГАТОМ МАЛОЇ ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ КЕРУВАННЯМ РЕЖИМАМИ ЕНЕРГООБМІНУ

Виконав:

здобувач вищої освіти денної форми
навчання освітнього ступеня «Бакалавр»,
освітньо-професійної програми
«Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка» спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

_____ **Микола МАМЧУР**

Керівник: канд. техн. наук, доцент

_____ **Ігор ГАРАСИМЧУК**

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

Допускається до захисту:

«_____» _____ 2026 р.

Гарант _____ освітньої програми
«Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка» спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка» кандидат технічних
наук, доцент

_____ **Ігор ГАРАСИМЧУК**

м. Кам'янець-Подільський, 2026

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	2
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ТЕХНОЛОГІЙ МАЛОЇ ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ.....	9
1.1. Класифікація та конструктивні особливості систем генерування електроенергії.	9
1.1.1. Характеристика об'єктів теплової енергетики.	10
1.1.2. Технологічні аспекти атомної енергетики.	10
1.1.3. Специфіка функціонування гідроенергетичних вузлів.....	11
1.1.4. Огляд альтернативних та відновлюваних енергоресурсів.....	12
1.2. Технічні рішення та класифікація малих ГЕС.....	13
1.3. Теоретичні засади та практичне використання машин подвійного живлення (МПЖ).....	15
1.3.1. Огляд конструкцій безконтактних МПЖ.	17
1.3.2. Принципи побудови систем управління машинами подвійного живлення.	19
Висновки до розділу 1	24
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГЕНЕРАТОРА.....	25

2.1. Методика визначення характеристик гідротурбіни та вибір потужності агрегату.....	25
Висновки до розділу 2	29
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	30
3.1. Розробка математичного опису генератора та ідентифікація його робочих параметрів.....	30
3.2. Алгоритмізація та проєктування структури системи керування. ...	33
Висновки до розділу 3	36
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ.....	37
4.1. Формування математичного апарату для аналізу статичних і динамічних режимів МПЖ.....	37
4.2. Апробація моделі та оцінка ефективності функціонування МПЖ у генеруючій установці.....	40
Висновки до розділу 4	42
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	43
Висновки до розділу 5	49
РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ	51
6.1. Аналіз умов праці та потенційних небезпек при експлуатації міні-ГЕС.....	51
6.1.1. Ідентифікація небезпечних виробничих факторів.....	51
6.1.2. Шкідливі виробничі фактори.....	52
6.1.3. Категорування приміщень	53

6.2. Організаційні та технічні заходи забезпечення безпеки.....	54
6.2.1. Організаційні заходи.....	54
6.2.2. Технічні заходи при виконанні робіт зі зняттям напруги.....	55
6.2.3. Заходи безпеки при програмному налагодженні.....	56
6.3. Захист від ураження електричним струмом.....	57
6.3.1. Захисне заземлення.....	57
6.3.2. Контроль ізоляції та захисне розділення кіл.....	57
6.3.3. Автоматичне відключення живлення	58
6.3.4. Вирівнювання потенціалів	58
6.4. Електробезпека при роботі з силовими напівпровідниковими перетворювачами	59
6.4.2. Безпека при експлуатації тиристорних НПЧ	60
6.4.3. Гальванічна розв'язка системи керування	61
6.4.4. Захист від електромагнітних завад.....	61
6.5. Пожежна безпека та захист електроустановок	62
6.5.1. Попередження пожеж у силових ланцюгах	62
6.5.2. Пожежна безпека систем накопичення (АКБ).....	63
6.5.3. Засоби пожежогасіння.....	63
6.5.4. Вогнестійкість кабельних ліній	64
6.6. Техніка безпеки при роботі з акумуляторними батареями та накопичувачами.....	65
6.6.1. Вимоги до приміщення та вентиляції	65
6.6.2. Електробезпека та запобігання коротким замиканням.....	65
6.6.3. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ).....	66
6.6.4. Безпека при роботі з високовольтними збірками	66

ВИСНОВКИ.....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	70

ВСТУП

Обґрунтування актуальності теми. Сучасний стан енергетичного сектору України вимагає активного пошуку шляхів диверсифікації джерел енергії та підвищення рівня енергетичної незалежності. Мала гідроенергетика є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку відновлюваної енергетики, оскільки вона характеризується екологічною чистотою, високим коефіцієнтом корисної дії та здатністю забезпечувати стабільне енергопостачання локальних об'єктів у віддалених районах.

Особливістю малих водотоків є нестабільність гідрологічного режиму, що призводить до постійних змін швидкості обертання турбіни. Традиційні системи з синхронними генераторами вимагають жорсткої стабілізації швидкості вала для підтримки стандартної частоти мережі, що суттєво ускладнює конструкцію та знижує ефективність відбору потужності.

Використання машин подвійного живлення (МПЖ) дозволяє вирішити цю проблему, забезпечуючи генерацію напруги стабільної частоти при змінній швидкості обертання первинного рушія. Завдяки інтелектуальному керуванню режимами енергообміну через роторне коло, стає можливим не лише оптимізувати виробіток енергії, а й активно впливати на якість напруги, регулюючи реактивну потужність. Це робить тему проектування системи керування таким агрегатом надзвичайно актуальною для сучасної електроенергетики та агропромислового комплексу.

Мета роботи — проектування та дослідження інтелектуальної системи векторного керування генераторним агрегатом на основі машини подвійного живлення для оптимізації процесів енергообміну в умовах змінної швидкості водного потоку.

Для досягнення поставленої мети у кваліфікаційній роботі визначено такі **завдання**:

1. Провести аналітичний огляд сучасних систем малої гідроенергетики та обґрунтувати переваги застосування машин подвійного живлення.
2. Виконати енергетичний розрахунок параметрів гідротурбіни та визначити необхідну потужність генератора для забезпечення потреб житлового об'єкта.
3. Розробити математичну модель системи «первинний двигун – МПЖ – мережа» у синхронній системі координат.
4. Синтезувати алгоритм векторного керування моментом та потокозчепленням генератора з орієнтацією за вектором напруги мережі.
5. Провести комп'ютерне моделювання статичних та динамічних режимів роботи системи в пакеті MATLAB/Simulink для підтвердження стійкості та точності алгоритмів.
6. Розробити функціональну схему практичної реалізації системи керування на базі мікропроцесорного контролера та сучасних напівпровідникових перетворювачів.
7. Опрацювати питання охорони праці та пожежної безпеки при експлуатації проекрованої установки.

ВИСНОВКИ

На основі аналізу різних джерел виробництва електроенергії, включаючи теплові, атомні, гідроелектростанції та альтернативні технології, було визначено, що саме мала гідроенергетика має найбільший потенціал для забезпечення електропостачання у віддалених районах. Дослідження конструкцій мінігідроелектростанцій та типів генераторів показало, що найбільш ефективним рішенням для таких систем є використання машини подвійного живлення, яка поєднує гнучкість керування та високу енергетичну ефективність.

Виконано розрахунок необхідної потужності для забезпечення електроенергією стандартного житлового будинку, а також визначено параметри гідрогенератора на основі характеристик водного потоку невеликого струмка.

Розроблено математичну модель системи та побудовано структуру векторного керування моментом машини подвійного живлення. Запропонований підхід забезпечує асимптотичне регулювання електромагнітного моменту та потокозчеплення, що дозволяє досягти високої точності керування.

Результати моделювання підтвердили ефективність алгоритму: похибка відпрацювання моменту не перевищує $0,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$, регулювання моменту зберігається навіть при зміні швидкості машини, а струми ротора у всіх режимах залишаються в межах допустимих значень для вибраного асинхронного двигуна з фазним ротором.

Створено функціональну схему системи, описано режими роботи машини у генераторному режимі та визначено ключові елементи системи керування генератором на базі машини подвійного живлення, що необхідні для практичної реалізації запропонованої концепції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Про альтернативні джерела енергії : Закон України від 20 лют. 2003 р. № 555-IV. Відомості Верховної Ради України. 2003. № 24. ст. 155.
2. Правила улаштування електроустановок. Видання 4-те, перероблене і доповнене. Харків : Форт, 2017. 608 с.
3. Journal of Multi Disciplinary Engineering Technologies. URL:: <http://www.jmdet.com/wp-content/uploads/2016/05/Paper-03.pdf>
4. Кириленко О. В., Денисюк С. П. Інтелектуальні електричні мережі: Smart Grid та MicroGrid : навчальний посібник. Київ : ІЕД НАН України, 2015. 84 с.
5. Коцур М. І., Коцур І. М. Особливості математичного моделювання систем генерування на основі машин подвійного живлення. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2016. Вип. 4. С. 36–42.
6. MERLION. URL: <https://220volt.com.ua/akkumulyatornaya-batareya-merlion-gp12330m6-12-v-33ah-6015/>
7. Xebike: Контролер BMS. URL: <https://xebike.com/product/kontroller-zashhity-akkumulyatora-bms-pcm-litij-li-ion-lipo-lifepo4-3-204s-100-1000a-12v-750v/>
8. Пересада С. М., Ковбаса С. М., Бовкунович М. С. Адаптивне векторне керування асинхронними двигунами: теорія та практика : монографія. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 184 с.
9. Пушкар М. В. Математична модель асинхронної машини з фазним ротором у системі координат, орієнтованій за вектором напруги статора. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2014. № 1. С. 63–69.

10. Abad G., Lopez J., Rodriguez M., Pantuzo G. Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Applications. Hoboken : Wiley-IEEE Press, 2011. 625 p.
11. T.F. Chan, L.L. Lai, Yan Lie-Tong, "Performance of a three-phase AC generator with inset NdFeB permanent-magnet rotor," IEEE Trans. Energy Conversion, vol.19, no.1, pp. 88– 94, March 2004.
12. Boldea I. Variable Speed Generators. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2015. 546 p.
13. Bose B. K. Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. Amsterdam : Academic Press, 2006. 936 p.
14. Chan T. F., Lai L. L. Performance of a three-phase AC generator with inset NdFeB permanent-magnet rotor. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2004. Vol. 19, no. 1. P. 88–94.
15. Leonhard W. Control of Electrical Drives. 3rd ed. Berlin : Springer, 2001. 460 p.
16. Mohan N. First Course on Power Electronics. Minneapolis : MNPERE, 2007. 248 p.
17. Peña R., Cárdenas R., Clare J., Asher G. Vector control of a doubly fed induction generator for variable speed wind turbines. IEEE Transactions on Energy Conversion. 1996. Vol. 11, no. 4. P. 713–718.
18. Tapia A., Tapia G., Ostolaza J. X., Saenz J. R. Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2003. Vol. 18, no. 2. P. 194–204.
19. Teodorescu R., Liserre M., Rodriguez P. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. Chichester : Wiley, 2011. 398 p.
20. Zhu Z. Q., Hu J. Control of Grid-Connected Doubly Fed Induction Generators: Theory and Practice. Singapore : John Wiley & Sons, 2018. 350 p.
21. XEnergotrade: Автономні інвертори. URL: <https://energotrade.su/inventory/invertor-1kw.htm>

22. Методичні рекомендації з підготовки кваліфікаційних робіт освітнього ступеня «Бакалавр» / Людмила МИХАЙЛОВА, Ігор ГАРАСИМЧУК, Павло ПОТАПСЬКИЙ та ін. За загальною редакцією Людмили МИХАЙЛОВОЇ, Ігоря ГАРАСИМЧУКА. Кам'янець-Подільський: ЗВО «ПДУ», 2026. – 43с.