УДК 621.311 DOI 10.31548/energiya2022.04.034

ОБҐРУНТУВАННЯ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОГО ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЬОВОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ВІТРОУСТАНОВКИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОДОРОЖНЬОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

В. В. Козирський, доктор технічних наук, професор

С. М. Волошин, кандидат технічних наук, доцент

А. В. Петренко, кандидат технічних наук, доцент

О. І. Тарасюк, аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України

М. І. Трегуб, доктор технічних наук, професор

Білоцерківський національний аграрний університет

E-mail: oleg535135@gmail.com

Анотація. *Стаття присвячена дослідженням зі створення електромагнітних систем генерації електричної енергії, що використовують вітрові потоки дорожньої інфраструктури. Аеродинамічна модель повітряного потоку рухомого автотранспорту оцінюється на підставі відомих моделей, виконаних на основі рівнянь аеродинаміки.. Для побудови електромагнітної системи електрогенератора вертикально-осьової вітроустановки, призначеної для енергозабезпечення автодорожньої інфраструктури, необхідно врахувати особливі вимоги до ефективності використання різнонаправлених повітряних потоків від рухомого автотранспорту та одночасно вітрової активності з будь-якого напряму. Проведено експериментальні дослідження швидкості вітрових потоків, що утворюються рухом транспорту на автострадах, які підтвердили можливість використання їх енергії вітроагрегатами з вертикальною віссю. Проведено аналіз наукових джерел розробок генераторів для сумісного використання з вертикально-осьовими турбінами. Розглянуто декілька типів вже існуючих генераторів та детально описано конструктивну схожість із запропонованим прототипом, а також наявний ряд принципових недоліків. Результатом розробки стало створення системи зі збільшеною вертикальною силою магнітного підвісу з механічною передачею її на вітрову турбіну, мінімізацією пульсацій вертикальних сил магнітного підвісу та зменшенням потоків розсіювання, спрощення процесів виготовлення і ремонту обмоток.*

Ключові слова: *децентралізоване енергозабезпечення, вітрові потоки автотранспорту, автодорожня вітроустановка, аксіальний магнітний потік, діелектричний ротор, аксіальна полярність ротора, вертикальний магнітний підвіс, поперечні потоки розсіювання, магнітна рівновага*

Актуальність. Розвиток дорожньої інфраструктури сучасних автотрас потребує використання усіх наявних джерел енергії на всій протяжності. Особливу актуальність має використання поновлюваних джерел генерування з огляду на те, що нині це більш вигідно, ніж побудова спеціальної споживчої електромережі на всій протяжності автомобільних доріг. Децентралізоване генерування електричної енергії на безтрансмісійних вертикально-осьових вітрових і низьконапірних гідравлічних турбінах потребує низько обертових безконтактних генераторів з вертикальним магнітним підвісом.

Застосування сучасних висококоерцитивних магнітів дозволяє не лише мати необхідні енергетичні, але й габаритні показники, одночасно з досить простою будовою вертикального магнітного підвісу. Однак відомі методи розрахунків магнітоелектричних генераторів та конструкцій магнітних підвісів не враховують специфіки конфігурації магнітних систем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз наукових джерел розробок генераторів для сумісного використання з вертикально-осьовими турбінами показав таке.

Розроблений безконтактний генератор, призначений для встановлення на безтрансмісійних вітроелектричних установках [2], у якому багатополюсний ротор виконаний кільцеподібним з набраними полюсними пакетами з пластин електротехнічної сталі, а статор виконаний дугоподібним і встановлений на нижній частині кільцевого ротора, що розраховано для вітрової турбіни з горизонтальною віссю. Однак для вітроелектричної установки вертикального типу така конструкція неприйнятна, оскільки напрям індукції в повітряному проміжку радіальний і тому діє лише однобічне радіальне магнітне притягування ротора.

Відомий також генератор [3], де магніти на периферійній частині дискового ротора встановлені однойменними полюсами в одному аксіальному напрямі, на статорі встановлена одна або симетрично декілька пар постійних магнітів, розташованих з обох боків навпроти магнітів на дисковому роторі, напрямлених до них однойменними полюсами. Вал ротора також встановлений на радіальних магнітних підшипниках. За рахунок постійних сил відштовхування магнітів з

однойменними полюсами в протилежних аксіальних напрямах дисковий ротор займає середнє положення в повітряному проміжку без механічного контактування. Спільними ознаками аналогу з пропонованим генератором є однобічне аксіальне орієнтування магнітів на дисковому роторі та встановлення постійних магнітів на статорі для виконання магнітного підвісу.

Така аксіальна електрична машина забезпечує роботу без механічного тертя за рахунок магнітного підвісу, однак є найбільш ефективною лише при горизонтальному положенні вала, коли сила ваги не діє однобічно в аксіальному напрямі, що має місце, наприклад, у вертикально-осьових вітроустановках. Крім того магнітні підшипники, що встановлені на валу, не можуть використовуватися без конструктивних змін при встановленні ротора не на валу, а на нерухомій вертикальній осі.

Відомий також аксіальний магнітоелектричний генератор [4], що складається з нерухомого статора, магнітопровід якого тороїдної форми, виконаний із стрічкової електротехнічної сталі та обмоткою на ньому і дископодібного ротора з постійними магнітами, однобічно орієнтованими однойменними полюсами в аксіальному напрямі, а на статорі перед магнітопроводом жорстко закріплено один або кілька постійних магнітів, аксіально встановлених однойменними полюсами до однойменних полюсів магнітів ротора. Обмотка виконана на суцільній ділянці магнітопроводу статора перпендикулярно до зовнішньої циліндричної поверхні дискового ротора. За рахунок постійних магнітів, встановлених на статорі аксіально полюсами до однойменних полюсів магнітів ротора, забезпечується безконтактна стабілізація відстані повітряного проміжку електричної машини. Обумовлена також принципова можливість створення симетричної трифазової системи змінного струму за рахунок взаємного зміщення трьох магнітопроводів статора на третину полюсної поділки ротора. Конструкцією передбачене механічне коригування відстані між полюсами магнітів статора і ротора регулювальними гвинтами.

У запропонованій конструкції передбачено виконання ротора дискової форми та встановлення на ньому постійних магнітів, орієнтованих аксіально однойменними полюсами в одному напрямі, виготовлення магнітопроводів статора

тороїдної форми та встановлення на статорі постійних магнітів, орієнтованих полюсами до магнітів ротора. Такий аксіальний магнітоелектричний генератор дійсно можна встановлювати на вертикально-осьових вітроелектричних установках, однак в цьому випадку він має ряд принципових недоліків. Так, при вертикальному встановленні осі дискового ротора сила ваги всіх приєднаних до ротора обертових мас буде спрямована вертикально вниз і співпадатиме з відштовхувальною силою верхнього магніту статора, що викликатиме зменшення нижнього повітряного проміжку генератора, тобто верхня і нижня частини повітряного проміжку будуть неоднакові за умови силової рівноваги. Крім того виконання обмоток на суцільній ділянці тороїдного магнітопроводу статора перпендикулярно до зовнішньої поверхні дискового ротора дає високу ймовірність механічних пошкоджень обмоток, збільшені потоки розсіювання, а також неможливість встановлення змінних котушкових обмоток, що суттєво ускладнює її виготовлення і ремонт.

Мета дослідження - обґрунтування типів автодорожніх вітроустановок і методів побудови та розрахунків магнітоелектричних генераторів з вертикальним магнітним підвісом. **Матеріали та методи дослідження.** Застосовувалися графічний аналіз, теоретичні розрахунки, конструкторські дослідження, та графічне моделювання.

Результати досліджень та їх обговорення.. Для побудови електромагнітної системи електрогенератора вертикально-осьової вітроустановки, призначеної для енергозабезпечення автодорожньої інфраструктури необхідно врахувати особливі вимоги до ефективності використання різнонаправлених повітряних потоків від рухомого автотранспорту та одночасно вітрової активності. Формування повітряних потоків біля автотрас показане на схемі (рис.1). Статистична модель руху різних типів автомобілів на різних ділянках з дозволеною швидкістю регламентує напрям обертання вітрової турбіни. Так для встановлення на існуючій розділовій смузі 4 за умови правобічного руху регламентовано напрям обертання проти годинникової стрілки, а вітроустановки обабіч траси матимуть однаковий напрям обертання за годинниковою стрілкою. При цьому обидва типи вітроустановок можуть одночасно використовувати вітер з будь-якого напряму.

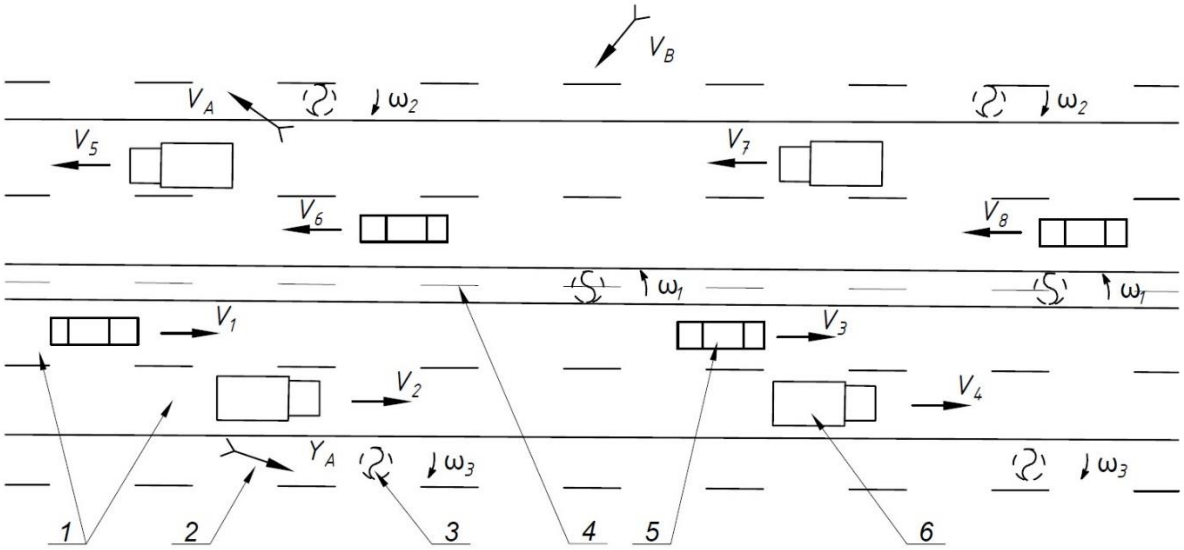

Рис. 1. Схема формування повітряних потоків рухомим автотранспортом: 1 – смуги правобічного руху; 2 – прилегла смуга узбіччя; 3 – план вітрової турбіни; 4 – розділова смуга зустрічних потоків автотранспорту; 5 – легкові автомобілі; 6 – вантажний автотранспорт; $v_1 – v_8$ швидкості руху автомобілів; $v_в$ – швидкість вітру; v_A – швидкість повітряного потоку від автотранспорту; ω_1 – кутова швидкість вітрової турбіни на розділовій смузі; ω_2 і ω_3 – кутові швидкості вітрових турбін на прилеглих смугах узбіччя

Аеродинамічну модель повітряного потоку рухомого автотранспорту можна оцінити на підставі відомих моделей, виконаних на основі рівнянь аеродинаміки [1]. Враховуючи те, що повітря має кінематичну в’язкість на відміну від ідеальних газів модель створеного автомобілем повітряного потоку матиме загалом напрям, близький до напряму руху поверхні. Крім того процес обтікання поверхні з утворенням вихрових потоків викликає повітряні потоки, спрямовані навздогін рухомому транспорту, що найбільш характерно для великогабаритних вантажних автомобілів. Важливо зазначити, що для вертикально-осьових вітрових турбін одночасно можна використовувати повітряні потоки від рухомого автотранспорту та вітер з будь-якого напряму. Описаний аеродинамічний аналіз дозволяє назвати загальні технічні вимоги до автодорожніх вітроустановок: ефективність використання одночасних вітрових потоків з різних напрямів, можливість напрямів

обертання за годинниковою стрілкою для вітрових турбін на прилеглих до узбіччя смугах і напрям обертання проти годинникової стрілки для вітрових турбін, встановлених на розділових смугах.

Експериментальні дослідження швидкості вітрових потоків, що утворюються рухом транспорту на автострадах, підтвердили можливість використання їх енергії вітроагрегатами з вертикальною віссю.

Завданням нової розробки генератора є збільшення вертикальної сили магнітного підвісу з механічною передачею її на вітрову турбіну, мінімізація вертикальних силових пульсацій магнітного підвісу та спрощення процесу виготовлення і ремонту обмоток.

Збільшення вертикальної сили магнітного підвісу досягається за рахунок встановлення нижніх нерухомих постійних магнітів статора однойменними полюсами до магнітів ротора, а верхніх магнітів різнойменними полюсами до полюсів магнітів ротора. Зменшення магнітних потоків розсіювання досягається за рахунок встановлення обмоток на ділянках тороїдного магнітопроводу статора, розташованих найближче до полюсів магнітів ротора по обидва боки від дискового ротора без небезпеки їх механічного пошкодження, спрощення процесів виготовлення і ремонту обмоток досягається за рахунок попередньої намотки їх на котушковий корпус і встановлення їх шляхом насаджування на ближні ділянки магнітопроводу з боку повітряного проміжку. Запропонований вітроелектричний генератор з постійними магнітами показаний на рис.2 і рис.3. Корпус дискового ротора 1 на периферійній частині 2 виготовлений із діелектричного немагнітного матеріалу, наприклад, текстоліту або пластику, чи, кераміки, де встановлені постійні магніти 3, орієнтовані площинами однойменних полюсів в одному аксіальному напрямі. Постійні магніти 3 мають циліндричну форму з полюсами на протилежних основах, бо за такої форми досягають зменшення магнітних пульсацій та простоти і надійності закріплення на дисковому роторі. У центрі дискового ротора 1 виконаний підшипниковий вузол 4 для встановлення його на вертикальній осі 5. На корпусі дискового ротора 1 встановлені симетричні вертикальні стрижні 6 для сполучення його з вертикальною вітровою турбіною, яку встановлюють зверху над ним на

верхній частині вертикальної осі 5. Статор генератора складається з циліндричного корпуса 7, жорстко закріпленого до вертикальної осі 5 нижче під дисковим ротором 1. На статорі 7 встановлені магнітопроводи 8 з обмотками 9, які зміщені по корпусу статора на 120°, а кожен з трьох сусідніх пакетів взаємно зміщений на третину полюсного поділу для утворення симетричної трифазової системи. На корпусі статора 7 також встановлені корпуси магнітних підвісів 10, виготовлених із діелектричного немагнітного матеріалу, де встановлені магніти 11 нижче під дисковим ротором та магніти 12 вище над дисковим ротором. Верхні і нижні магніти закріплені в окремих частинах неметалевого корпуса 10 та мають гвинти кріплення 13 для зміни відстані окремо верхнього і нижнього повітряних проміжків. Нижні магніти 11 встановлені однойменними полюсами до полюсів магнітів ротора, а верхні магніти 12 встановлені до магнітів ротора різнойменними полюсами, що забезпечує однаковий напрям дії сил доверху.

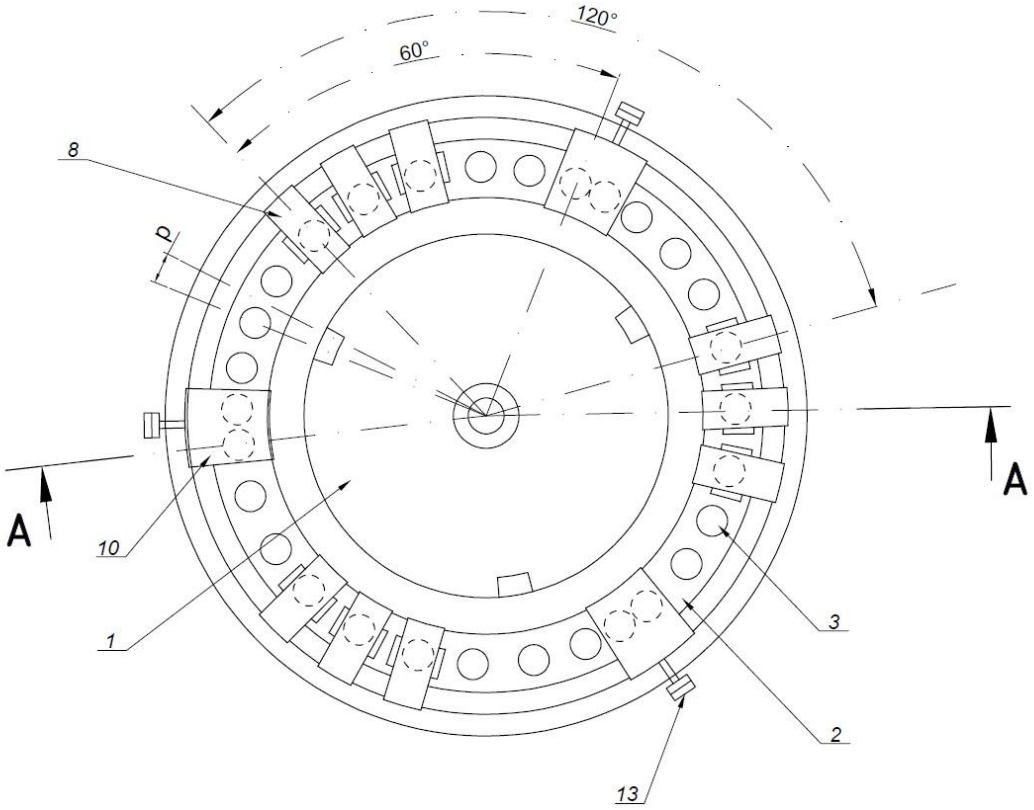

Рис. 2. Горизонтальна проекція електрогенератора на постійних магнітах:
1 - корпус дискового ротора; 2 - периферійна частина; 3 – постійні магніти; 8 - магнітопроводи; 10 - корпуси магнітних підвісів; 13 – гвинти кріплення

Принцип роботи генератора такий. Дисковий ротор генератора 1 приводиться в обертовий рух вітровою турбіною, або іншим приводом через вертикальні стрижні 6. У магнітопроводах статора 8 періодично змінюється магнітний потік, що викликає індукування змінної електрорушійної сили в обмотках 9, в яких при підключенні навантаження протікає змінний струм. Безперервно, як у нерухомому стані, так і під час обертання на ротор діють вертикально доверху сили відштовхування однойменних полюсів нижніх магнітів 11 і сили протягування різнойменних полюсів верхніх магнітів 12. За рахунок гвинтів 13 забезпечена технічна можливість встановлення окремо верхні і нижні відстані повітряних проміжків між полюсами магнітів, а за рахунок цього і сил відштовхування та притягування в одному напрямі доверху. В корпусі 10 знизу і зверху встановлені поряд по два магніти, однакові з магнітами ротора, що забезпечує відсутність вертикальних силових пульсацій та положень силової нерівномірності. Графічно можна переконатися, що під час руху ротора співпадатиме з магнітами 11 і 12 лише по одному магніту 3 ротора. Встановлення поряд по два магніти підвіски на статорі є мінімально можливим числом для мінімізації силових пульсацій.

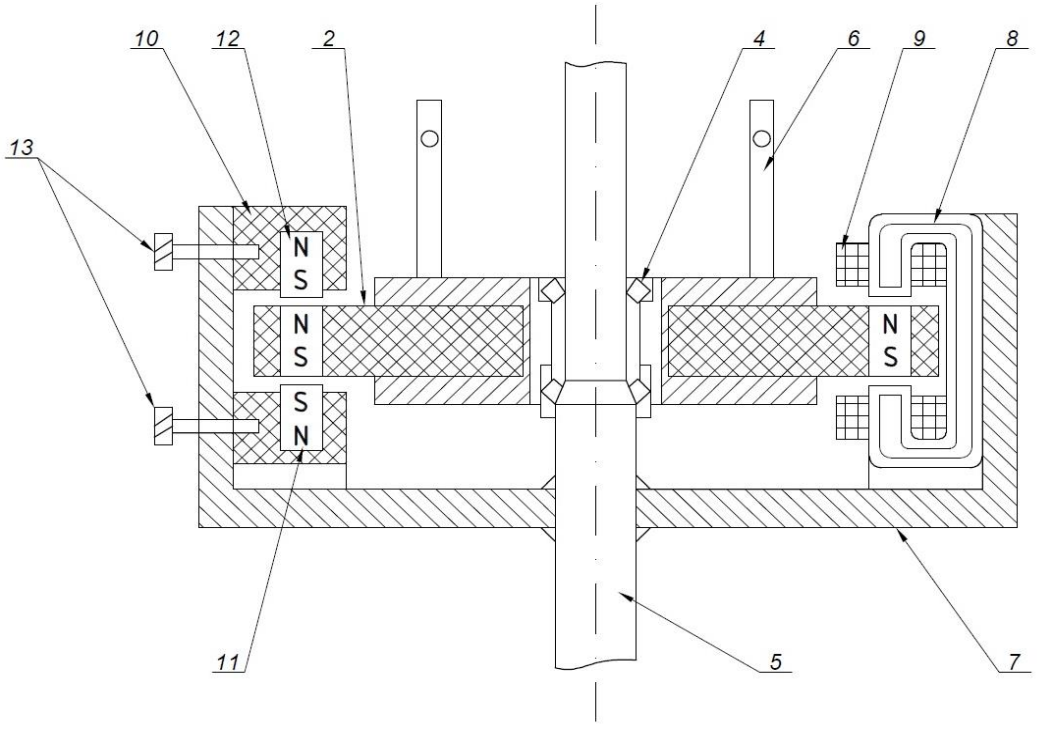

Рис. 3. Вертикальна проекція електрогенератора на постійних магнітах:
4 - підшипниковий вузол; 5 - вертикальна вісь; 6 - вертикальні стрижні; 7 – корпус статора; 9 - обмотки; 11 – нижні магніти; 12 – верхні магніти

На рис.2 показано горизонтальну проекцію електрогенератора на постійних магнітах, де корпус дискового ротора 1 встановлений на осі та показані постійні магніти 3, які встановлені на периферійній частині 2 ротора, виготовленій із діелектричного матеріалу. Показані місця встановлення магнітопроводів 8 статора у трифазових блоках, розставлених по колу через 120^o та корпусів вертикального магнітного підвісу 10, встановлених також по колу симетрично через 120^o та на 60^o відносно магнітопроводів статора. Показано відстань полюсного поділу p та напрям уявного розрізу А–А, який зображено на рис. 3, де показано положення полюсів магнітів 3 ротора і магнітів 11 та 12 з гвинтами кріплення 13. Показано розташування вертикальних стрижнів 6 на дисковому роторі 1 для приєднання до вертикальної вітрової турбіни.

Технічний результат розробки електромагнітної системи електрогенератора полягає у збільшенні вертикальної сили магнітного підвісу з механічною передачею її на вітрову турбіну, мінімізації пульсацій вертикальних сил магнітного підвісу, зменшенні потоків розсіювання та спрощенні процесів виготовлення і ремонту обмоток.

Висновки та перспективи.

1. Для побудови електромагнітної системи електрогенератора вертикально-осьової вітроустановки, призначеної для енергозабезпечення автодорожньої інфраструктури, необхідно врахувати особливі вимоги до ефективності використання різнонаправлених повітряних потоків від рухомого автотранспорту та одночасно вітрової активності.

2. Результатом розробки електромагнітної системи електрогенератора є збільшення вертикальної сили магнітного підвісу з механічною передачею її на вітрову турбіну, мінімізація пульсацій вертикальних сил магнітного підвісу, зменшення потоків розсіювання та спрощення процесів виготовлення і ремонту обмоток.

Список використаних джерел

1. Седов Л. И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. 2-е изд. М.: «Наука», 1965. 244 с.
2. Пат. на винахід UA №95048, МПК H02K21/48, H02P9/10, 25.06.2011, Бюл. №12.
3. Патент України на кор. мод. UA №131377, H02K 21/12, F16C 32/04, 10.01. 2019, Бюл. №1.
4. Патент України на кор. мод. UA №78084, МПК H02K 21/12, H02K 21/24, 10.04.2013, Бюл. №7.

References

1. Sedov, L. I. (1965). Ploskiye zadachi gidrodinamiki i aerodinamiki [Flat problems of hydrodynamics and aerodynamics]. Moskow: Nauka, 244.
2. Pat. for invention UA No. 95048, IPC H02K21/48, H02P9/10, 25.06.2011, Bull. No. 12.
3. Patent of Ukraine on cor. fashion UA No. 131377, H02K 21/12, F16C 32/04, 10.01. 2019, Bull. No. 1.
4. Patent of Ukraine on cor. fashion UA No. 78084, IPC H02K 21/12, H02K 21/24, 04/10/2013, Bull. No. 7.

SUBSTANTIATION OF MAGNETOELECTRIC VERTICAL-AXIAL GENERATOR FOR WIND TURBINE POWER SUPPLY OF ROAD INFRASTRUCTURE

V. Kozyrsky, S. Voloshin, A. Petrenko, O. Tarasyuk, M. Tregub

Abstract. *The article is devoted to research on the creation of electromagnetic systems of electricity generation using wind flows of road infrastructure. The aerodynamic model of the air flow of a moving vehicle is evaluated on the basis of known models made on the basis of the equations of aerodynamics. For the construction of the electromagnetic system of the electric generator of a vertical-axial wind turbine intended for the energy supply of road infrastructure, it is necessary to take into account special requirements for the efficiency of the use of multidirectional air flows from moving vehicles and wind activity from any direction. Experimental studies of the speed of wind flows generated by traffic on highways were conducted and confirmed the possibility of using their energy by wind turbines with a vertical axis. An analysis of scientific sources of generator development for compatible use with vertical-axis turbines was carried out. Several types of existing generators are considered and the structural similarity with the proposed prototype is described in detail, as well as a number of fundamental shortcomings.*

The result of the development was the creation of a system with increased vertical force of the magnetic suspension with its mechanical transmission to the wind turbine, minimizing the pulsations of the vertical forces of the magnetic suspension and reducing scattering fluxes and simplifying the manufacture and repair of windings.

Key words: ***decentralized energy supply, wind flows of motor vehicles, road wind turbine, axial magnetic flux, dielectric rotor, axial polarity of the rotor, vertical magnetic suspension, transverse scattering fluxes, magnetic balance***