

ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КІЛЬЦЕВОГО РОТОРА БЕЗКОНТАКТНОГО ДУГОСТАТОРНОГО ІНДУКТОРНОГО ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА

***В.В. Козирський, доктор технічних наук
М.І. Трегуб, кандидат технічних наук***

Наведено методи оптимізації геометричних параметрів функціональних деталей кільцевого ротора безконтактного дугостаторного індукторного вітроелектричного генератора, що відповідають головним спільним вимогам аеродинамічної та електромеханічної систем.

Вітроелектричний індукторний генератор, кільцевий ротор, оптимальні геометричні розміри.

Актуальним завданням при створенні безтрансмійної вітроелектричної установки (БВЕУ) вважається розробка безконтактного дугостаторного електрогенератора з кільцевим ротором великого діаметра, що дозволяє [5] досягати більш високих лінійних швидкостей електромагнітноактивних елементів без втрат енергії у механізмах мультиплікації. Загальна ідея кільцеподібної конструкції ротора горизонтально-осьової БВЕУ відома досить давно [3, 8]. Однак тоді розглядалися конструктивні схеми, технічна реалізація яких за існуючих рівнів розвитку техніки і технологій була надто складною. Відомі також приклади вирішення окремих технічних задач, наприклад удосконалення аеромеханічної системи БВЕУ [6], або розробка магнітоелектричного дугостаторного генератора [7]. Але загальні методи обґрунтування оптимальних геометричних параметрів функціональних деталей кільцевого ротора безконтактного дугостаторного вітроелектричного генератора, які б задовільняли головні спільні вимоги аеродинамічної та електромеханічної систем потребують подальших досліджень.

Мета досліджень – обґрунтування методів оптимізації геометричних параметрів функціональних деталей кільцевого ротора безконтактного дугостаторного індукторного вітроелектричного генератора, які відповідають головним спільним вимогам аеродинамічної та електромеханічної систем.

Матеріали та методика досліджень. Методами теоретичного аналізу визначали вплив геометричних параметрів кільцевого ротора одночасно на аеродинамічні та електромеханічні показники. Порівнювалися відомі довідкові значення магнітної проникності матеріалів окремих ланок магнітної системи.

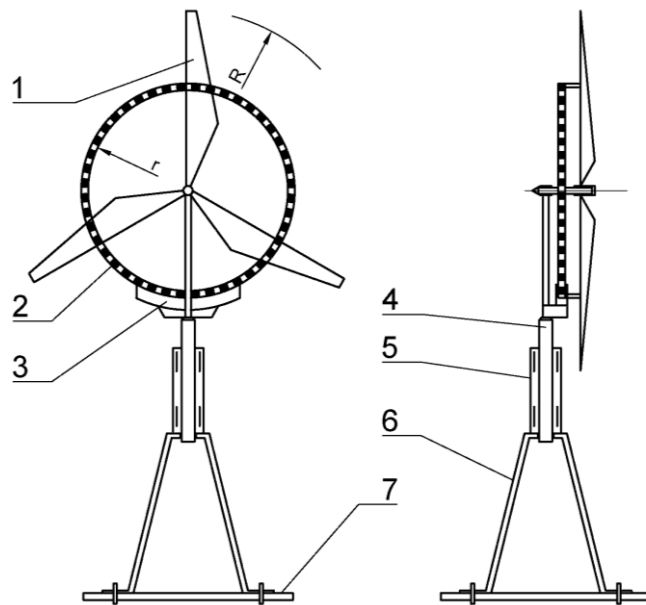


Рис.1. Загальна конструктивна схема БВЕУ із кільцевороторним дугостаторним електрогенератором:

1 – лопать; 2 – кільцевий ротор; 3 – дуговий статор; 4 – поворотна щогла; 5 – маточина поворотної щогли; 6 – опорний стояк; 7 – фундамент; R – радіус обертання кінців лопатей; r – радіус кільцевого ротора

Результати досліджень. Загальна конструктивна схема запропонованої [5] БВЕУ із кільцевороторним дугостаторним генератором зображена на рис.1.

Така конструкція БВЕУ принципово дозволяє отримати високі швидкості руху полюсних елементів ротора без енергетичних втрат у багаторівневих механізмах мультиплікатора. Крім того, за кільцеподібної конструкції відкритого ротора електрогенератора із дуговим статором існує технічна можливість виконання магнітної підвіски усього корпусу вітрогенератора за рахунок притягувальної сили магнітного потоку через повітряний проміжок між ротором і статором, що може забезпечити часткове, або повне розвантаження підшипникового вузла і горизонтальної осі від радіального навантаження, викликаного силою ваги. Одночасно кільцевий корпус ротора, встановлений на спільній з лопатями горизонтальній осі, принципово підвищує їхню механічну міцність у порівнянні з традиційним одноточковим консольним кріпленням, що дозволяє виготовляти лопаті більш тонкими з вищою аеродинамічною якістю. Не менш важливою є принципова технічна можливість використання кільцеподібного корпусу ротора безпосередньо як безтрансмійного механічного акумулятора енергії, що суттєво зменшує вплив нерівномірності миттєвих швидкостей вітру.

Проте встановлення кільцевого ротора навіть обтічної форми на обв'язній площі вітрогенератора впливає на його аеродинамічні показники. Тому, була визначена [2] пріоритетна послідовність виконання головних умов мінімізації енергетичних втрат у загальній аеро-електромеханічній

системі перетворення енергії вітру. Загальна методика формулювання основних вимог до конструктивних параметрів і принципового типу вітроелектричного генератора полягала у ранжуванні їхньої пріоритетності та визначенні умов досягнення оптимальних співвідношень між ними. Так найбільш пріоритетними вважаються аеродинамічні вимоги, оскільки ними обумовлена енергоефективність процесу приймання енергії вітрового потоку аеромеханічною системою ВЕУ. У свою чергу система обмежень досконалості аеродинамічних форм і розмірів кільцевого ротора викликана необхідною механічною міцністю конструкції, а також технічними можливостями виконання вітроелектричного генератора заданої потужності. Таким чином, були сформульовані такі інтегровані вимоги до конструкції кільцевого ротора:

- кільцевий корпус ротора дугостаторного генератора повинен мати видовжену відносно напрямку вітру обтічну форму профілю з мінімальним аеродинамічним перетином, обмеженим лише умовами механічної міцності та радіальними розмірами полюсів;

- механічна міцність кільцевороторної конструкції повинна забезпечуватися виконанням монолітної структури електромагнітно функціональних і корпусних деталей кільцевого ротора, встановленого на горизонтальній осі та сполученого аксіальними тягами з лопатями, а також за рахунок використання безконтактної силової дії магнітного поля між ротором і статором;

- монолітна структура корпусних і функціональних деталей кільцевого ротора з мінімальним аеродинамічним профілем повинна забезпечувати технічну реалізацію максимальної кількості та необхідної геометричної форми і розмірів його полюсних елементів.

Наведені інтегровані технічні вимоги дозволяють синтезувати загальні контури конфігурації електромагнітної системи кільцевороторного дугостаторного вітроелектричного генератора. Так серед принципово можливих варіантів оптимальною визначено радіально-кільцеву конфігурацію електромагнітної системи БВЕУ, схематично зображену на рис.2.

Головними аргументами щодо визначення радіально-кільцевої конфігурації як оптимального варіанта електромагнітної системи були наявні принципів технічні можливості максимального порівняно з іншими варіантами виконання більшості спільних вимог. У межах визначеної конфігурації детально аналізували взаємозалежні розміри функціональних деталей електромагнітної системи генератора з метою оптимізації абсолютних і відносних геометричних параметрів.

Загальна методика оптимізації полягала у поєднанні варіаційного методу з однобічним обмеженням варіативних геометричних параметрів. Так радіальна висота h кільцевого ротора оптимізувалася компромісними вимогами аеромеханічної системи у напрямі забезпечення мінімального аеродинамічного опору та вимогами електромагнітної системи з необхідністю максимальної зміни величини магнітної провідності механічним рухом полюсних елементів ротора. Сегментна ширина b феромагнітного елемента не мала аеродинамічних обмежень, а її

оптимальний розмір визначався спільно із аксіальною довжиною l взаємно альтернативними умовами виконання максимальної кількості полюсів ротора та максимальної магнітопровідної площі їх перетину. При цьому аксіальна довжина l у межах заданих конструктивних розмірів також вважалася незалежною від аеродинамічних вимог.

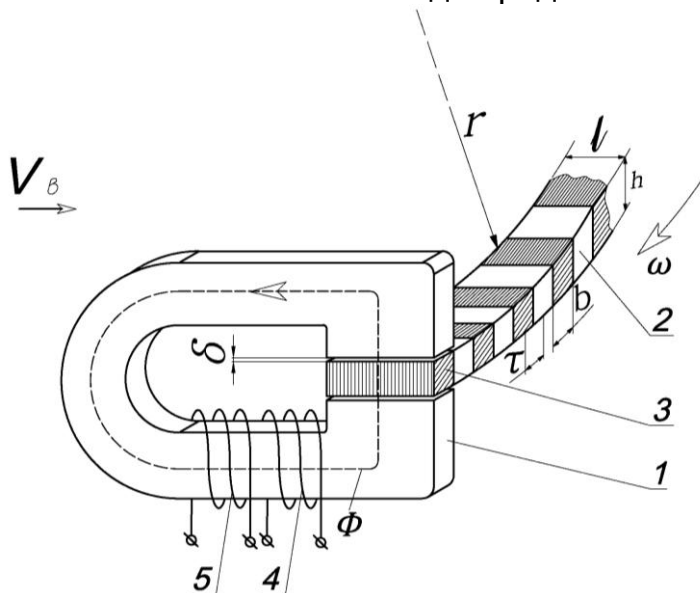


Рис. 2 Схематичне зображення елементарної ділянки електромагнітної системи індукторного генератора радіально-кільцевої конфігурації:

1 – магнітопровід секції статора; 2 – діамагнітна ділянка полюсного поділу ротора; 3 – феромагнітний полюсний елемент ротора; 4 – якірна обмотка; 5 – обмотка збудження; Φ – шлях магнітного потоку; δ – робочий повітряний проміжок; r – радіус кільцевого ротора; b , l , h – габаритні розміри функціональних елементів ротора; V_β – орієнтовний напрямок вітру

Оскільки в цій системі величина потокозчеплення за незмінної кількості витків і сили струму збудження залежить лише від провідності Λ магнітного кола, то оптимальним геометричним розміром h прийнято таке його мінімальне значення, яке за певних аеродинамічних обмежень забезпечує максимальні зміни цього параметра від Λ_{\max} до Λ_{\min} для індуктування максимальної е.р.с.

Максимальне значення магнітної провідності кола Λ_{\max} буде у положенні повного перекривання феромагнітним елементом ротора проміжку магнітопроводу статора і розраховуватиметься за виразом:

$$\Lambda_{\max} = \frac{1}{(R_\delta + R_\phi)} = \frac{1}{\frac{2\delta}{\mu_0 bl} + \frac{h}{\mu_\phi bl}} = \frac{bl}{\frac{2\delta}{\mu_0} + \frac{h}{\mu_\phi}}, \text{ Гн},$$

де R_δ – магнітний опір повітряного проміжку, Гн^{-1} ; R_ϕ – магнітний опір феромагнітного елемента ротора, Гн^{-1} ; μ_0 – магнітна проникність повітряного проміжку, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$; μ_ϕ – магнітна проникність феромагнітного елемента ротора, Гн/м .

Оскільки $\mu_{\phi} \gg \mu_0$, то Λ_{\max} залежить головним чином від розмірів робочого повітряного проміжку δ , а радіальна висота h феромагнітного елемента ротора на цей показник практично не впливає.

За відсутності магнітного насичення магнітопроводу статора залежність мінімальної магнітної провідності Λ_{\min} подібна до зміни провідності магнітного кола зміною величини повітряного проміжку поперечного перетину магнітопроводу. Мінімального значення магнітна провідність Λ_{\min} набуватиме за повного перекидання міжполюсного проміжку діамагнітною ділянкою ротора висотою h і без врахування явища випинання силових ліній магнітного поля визначатиметься виразом:

$$\Lambda_{\min} = \frac{1}{(R_{\delta} + R_d)} = \frac{1}{\frac{2\delta}{\mu_0 bl} + \frac{h}{\mu_d bl}}, \text{ Гн},$$

де R_d – магнітний опір немагнітопровідної ділянки полюсного поділу ротора, Гн^{-1} ; μ_d – магнітна проникність діамагнітного матеріалу немагнітопровідної ділянки полюсного поділу ротора, Гн/м , яку для розрахунків з достатньо високою точністю можна вважати $\mu_d = \mu_0$. Тоді мінімальна магнітна провідність розраховується простою залежністю від геометричних розмірів:

$$\Lambda_{\min} = \frac{bl\mu_0}{(h + 2\delta)}.$$

Вплив цього ж розміру на аеродинамічний опір кільцевого корпусу ротора можна оцінити силою лобового опору F_a його обвівної поверхні, яка розраховується за виразом:

$$F_a = C_x S_M \frac{\rho V^2}{2}, \text{ Н},$$

де C_x – коефіцієнт сили лобового опору (довідкові значення); S_M – міделевий (максимальний поперечний) перетин корпусу кільцевого ротора, м^2 , який для аксіального профілю буде:

$$S_M = \pi h(2r + h),$$

де r – радіус внутрішньої доцентрової поверхні кільцевого ротора, м.

Тоді сила опору обвівної поверхні кільцевого ротора загалом матиме вираз:

$$F_a = C_x S_M \frac{\rho \cdot V^2}{2} = C_x \pi \rho V^2 (rh + 0.5h^2), \text{ Н}.$$

Подібним до залежності міделєвого перетину буде також і вираз для кількісної оцінки зменшення обвівної площі вітроподвигуна вітровим затіненням кільцевим ротором:

$$\Delta S_K = S_M = \pi(2rh + h^2),$$

де ΔS_K – площа вітрового затінення кільцевим ротором, м^2 .

Ці вирази показують, що величина аеродинамічного опору кільцевого ротора і площа вітрового затінення ним вітроподвигуна мають слабовиражену параболічну залежність від радіальної висоти h кільця, оскільки $r \gg h$.

Ще одним важливим показником впливу розмірів кільцевого ротора на турбулентний характер обтікання його вітровим потоком є критерій Рейнольдса. Так за певної швидкості вітру і незмінної температури та в'язкості повітря, критерій Рейнольдса для ділянки кільцевого ротора описуватиметься виразом:

$$R_e = \frac{Vh}{\eta_{II}}$$

де V – швидкість вітру, м/с; h – радіальна висота кільцевого профілю варіативний лінійний розмір, м; η_{II} – коефіцієнт в'язкості повітря, м²/с.

Висота профілю кільцевого ротора h у цьому критерії є характерним варіативним розміром, оскільки діаметр, а також аксіальна довжина профілю мають фіксовані значення. На графіку (рис.3) залежність критерію Рейнольдса від розміру h за певної швидкості вітру V зображатиметься прямою, що виходить із початку координат із кутом нахилу, пропорційним швидкості вітру.

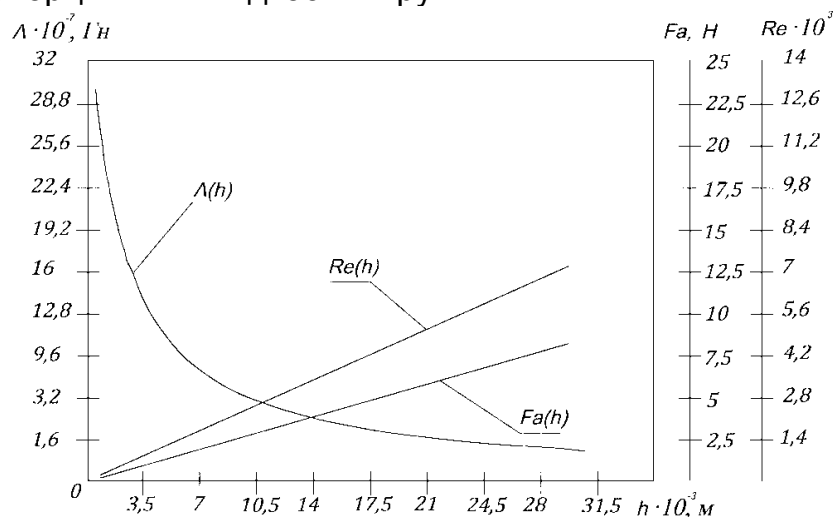


Рис.3. Залежності мінімальної магнітної провідності $\Lambda_{\text{мін}}$ немагнітної ділянки полюсного поділу ротора від радіальної висоти h та сили аеродинамічного опору F_a і критерію Рейнольдса Re від цього ж аргументу за незмінної швидкості вітру

Числові значення зображених функцій розраховані за незмінних конструктивних розмірів r , b , l і швидкості вітру 4 м/с.

З аналітичних залежностей можна отримати абсолютні значення максимальної та мінімальної магнітної провідності, а їх різниця $\Delta\Lambda$ визначитиметься за виразом:

$$\Delta\Lambda = \Lambda_{\text{max}} - \Lambda_{\text{min}} = \frac{bl}{\frac{2\delta}{\mu_0} + \frac{h}{\mu_\phi}} - \frac{bl\mu_0}{(h + 2\delta)}, \text{ Гн.}$$

Принцип дії кільцевороторного індукторного генератора базується на індукванні е.р.с. за рахунок гармонійної зміни магнітної провідності механічним рухом полюсних елементів ротора. Для індукторних генераторів з електромагнітним збудженням значення електромагнітної

сили, яка створює електромагнітний момент, можна отримати через змінний параметр магнітної провідності Λ магнітного кола системи:

$$F_M = -0.5(iw)^2 \frac{d\Lambda}{dx}, \text{ Н,}$$

де iw – добуток струму збудження на число витків обмотки; $d\Lambda/dx$ – похідна магнітної провідності в координатах лінійного руху феромагнітного елемента ротора через міжполюсний проміжок секції статора.

Тобто цільова функція зміни магнітної провідності буде:

$$\Delta\Lambda \rightarrow \text{MAX.}$$

На підставі аналізу наведених залежностей максимальне і мінімальне значення магнітної провідності розраховується за відомих геометричних розмірів і магнітних проникностей матеріалів відповідно феромагнітного полюсного елемента ротора та діамагнітної ділянки міжполюсного проміжку. Оскільки функції аеродинамічного опору та критерію Рейнольдса, а також магнітної провідності залежні від одного аргументу, то за умови сумірності масштабів оптимальні значення цього аргументу визначатимуться координатами точок перетину графіків (див. рис.3). Важливо, що всі названі функції скрізь безперервні, а в нижній частині мінімальна магнітна провідність із зростанням аргументу h асимптотично наближається до нульового значення, маючи виражену ділянку максимальної зміни похідної. Таким чином, система геометричних параметрів має голономний характер за рахунок фіксованих обмежень інших варіативних аргументів. Згідно з цією методикою множина оптимальних значень радіальної висоти h кільцевого ротора обмежується координатами точок перетину функції мініимальної магнітної провідності та функцій сили лобового опору і критерію Рейнольдса у діапазоні найімовірніших змін швидкості вітру. Оптимальне значення $h_{\text{опт}}$ може визначатися як середнє арифметичне значення аргументу між точками перетину графіків.

Очевидно, що наведені теоретичні розрахунки потребують суттєвих уточнень впливу розмірів міжполюсних відстаней ротора на додаткову магнітну провідність через потоки розсіювання, однак це можна просто врахувати числовою поправкою до абсолютного значення $\Lambda_{\text{мін}}$.

Крім узагальнених різносистемних вимог, сформульовані також принципові вимоги до конструктивного виконання безконтактних вітроелектричних генераторів, подібно до описаних у [1], із врахуванням специфіки використання їх на вітроустановці:

- відсутність на роторі обмоток з рухомими контактами;
- технічна можливість виконання мініимального аеродинамічного профілю;
- стійкість до механічних пошкоджень та дії атмосферних факторів;
- мініимальні масогабаритні показники одиниці об'ємної потужності;
- мініимальний магнітний момент за відсутності навантаження;
- мініимальні витрати дорогих магнітних та провідникових матеріалів.

За результатами теоретичного аналізу цих вимог визначено індукторний тип безконтактного кільцевороторного дугостаторного

вітроелектричного генератора та обґрунтовано спосіб мінімізації загального моменту, створеного магнітними потоками збудження окремих секцій статора. Таким чином, система обмежень визначає орієнтовні мінімально допустимі розміри полюсного поділу кільцевого ротора і за відомого його діаметра розраховується загальна кількість полюсів.

Однак діаметр кільцевого ротора є предметом оптимізації також і для аеромеханічної системи, оскільки повинен мати узгоджені показники швидкохідності з відповідними показниками основних лопатей. Згідно з цією методикою запропонована [5] конструкція кільцевого ротора, встановленого на внутрішньокільцевих лопатях, повинна мати кутову швидкість обертання, однакову із основними лопатями вітрогенератора, що принципово можливо лише за умови:

$$Z_r = Z_R \frac{r}{R},$$

де Z_r – швидкохідність кільцевого ротора, в.о.; Z_R – швидкохідність лопатевого вітрогенератора, в.о.; R – радіус кола обертання кінців основних лопатей вітрогенератора, м; r – радіус кільцевого ротора, м.

Оскільки розрахункова потужність БВЕУ залежить головним чином від розмірів основних лопатей, то радіус кільцевого ротора буде функціонально залежним від цього базового аргументу і визначатиметься виразом:

$$r = R \frac{Z_r}{Z_R}.$$

Ця залежність визначає загальну послідовність розрахунку оптимальних геометричних параметрів усієї аеро-електромеханічної системи БВЕУ, оскільки всі розміри взаємозалежні та згідно з наведеною методикою підпорядковані сформульованим у пріоритетній послідовності обмежувальним вимогам.

Висновки

1. Діаметр кільцевого ротора визначається за розрахованими відповідно до заданої потужності розмірами лопатей та співвідношенням відповідних швидкохідностей.

2. Оптимальний розмір радіальної висоти кільцевого ротора визначається методом знаходження мінімальної площі перетину його аксіального профілю та одночасно мінімальної магнітної провідності немагнітної ділянки полюсного поділу, залежних від спільного аргументу за незмінних інших габаритних показників.

3. Вибір оптимальної радіально-кільцевої конфігурації магнітного кола системи обумовлений максимальною відповідністю спільним головним вимогам аеродинамічної та електромеханічної систем.

Список літератури

1. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины / Д.А. Бут. – М.: Высш. шк., 1990. – 416 с.
2. Козирський В.В. Методологія вибору типу і геометричної конфігурації кільцеворотного дугостаторного генератора безредукторної вітроелектричної

установки. / В.В. Козирський, М.І. Трегуб // Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: міжнар. наук.- практ. конф.: тези доповідей. – К., 2013. – С. 57 –58.

3. Ляхтер В.М. Что может дать энергия ветра / В.М. Ляхтер // Наука в СССР. – 1991. – №1. – С.58 – 65.

4. Пат. №101118 Україна, МПК H02K19/20, H02K21/38 Індукторний аксіальний генератор / Трегуб М.І., Козирський В.В. – № а 2012 00837; заявл. 27.01.2012; опубл.25.02.2013, Бюл.№4.

5. Пат. №32851 Україна, F 03D 1/00. Безредукторна вітроенергетична установка/ Трегуб М.І. № и 2007 02848; заявл.19.03. 2007; опубл.10.06.2008, Бюл.№11.

6. Пат. №79610 Україна, F 03D 1/00. Безредукторна електромеханічна вітроустановка / Трегуб М.І., Василенко О.С. – и 2012 12856; заявл.12.11. 2012; опубл. 25.04.2013, Бюл. №8.

7. Трегуб Н.И. Обоснование типов и параметров электрогенераторов для безредукторных ветроэлектрических установок / Н.И. Трегуб, В.В. Гребеников, М.В. Прыймак // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2012. – Вип. 31. – С. 67 – 73.

8. Шефтер Я.И. Изобретателю о ветродвигателях и ветроустановках./ Я.И. Шефтер, И.В. Рождественский. – М.: Изд-во МСХ СССР, 1957. – 145 с.

Приведены методы оптимизации геометрических параметров функциональных деталей кольцеобразного ротора бесконтактного дугостаторного индукторного ветроэлектрического генератора, которые соответствуют главным общим требованиям аэродинамической и электромеханической систем.

Ветроэлектрический индукторный генератор, кольцевой ротор, оптимальные геометрические размеры.

Considers the methods to optimization of geometrical parameters of functional elements annual rotor in the contactless arc-shape stator with induction wind power generator, which correspond to the main common requirements of the aerodinamic and wind electro-mechanic systems.

Induction wind power generator, annual rotor, optimal geometrical parameters