

УДК 621.311.24

Ю.І. Чучман, М. Черепаняк*, С.Ю. Замська**

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра ЕМА,

*СКБ електромеханічних систем,

**кафедра техногенно-екологічної безпеки

**СИНТЕЗ СТРУКТУРИ АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ
ДЛЯ КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ**

© Чучман Ю.І., Черепаняк М., Замська С.Ю., 2001

Проаналізовано сучасний стан вітроенергетики. Показано, що при вирішенні питання про спорудження вітроелектростанції в конкретній місцевості необхідно зробити оцінку вітрової ситуації. Розроблено метод оцінки енергетичного потенціалу вітрів у даній місцевості. Розглянуто питання синтезу структури автономної вітроелектростанції. Показано, що безредукторні станції мають безперечні переваги. Наведено результати дослідження розробленого синхронного генератора зі збудженням від постійних магнітів.

The analysis of state of the modern of a wind power is conducted. The necessity of realisation of an estimation of a wind situation at a solution of the question about facility wind power plants in the given terrain is shown. The method of an estimation of an energy potential of winds in the given terrain is designed. The problem of synthesizing of structure autonomous wind power plant is reviewed. The indisputable advantages of gearless stations are demonstrated. The outcomes of research of the designed synchronous generator with excitation from permanent magnets are adduced.

Сучасна вітроенергетика. Енергетичні ресурси вітру практично невичерпні. Згідно з даними Департаменту енергетики США кожного року в світі за допомогою вітру можна виробити таку кількість енергії, яка є еквівалентною $5,8 \cdot 10^{18}$ БТО (Британських теплових одиниць), що в 15 разів перевищує теперішнє світове споживання енергії (10^{15} БТО приблизно відповідає енергії, що віддають 172 млн. барелей нафти, або 40 млн. тонн вугілля) [1].

Потужним імпульсом інтенсифікації використання вітру стала енергетична криза 1973 року, яка стимулювала проведення науково-дослідних та проектно-конструкторських робіт в цьому напрямку практично у всіх технічно розвинених країнах. Результатом стало те, що в 1993 році Дослідницький інститут електроенергії США дійшов висновку: “Є всі підстави очікувати, що в наступні 10–12 років вітер стане найбільш дешевим джерелом електроенергії з усіх існуючих”. Підтвердженням цієї тези є динаміка зміни вартості кВт·год електроенергії, яка виробляється вітроелектростанціями (ВЕС) США): 1980 р. – 30 центів, 1985 – 22 цента, 1990 – 7 центів, 1995 – 4 цента [1].

У березні 1995 року встановлена потужність ВЕС у провідних країнах світу становила: США –1717 МВт, Німеччина – 643 МВт, Данія – 540 МВт, Індія – 182 МВт, Нідерланди – 153 МВт, Великобританія – 147 МВт, Іспанія – 72 МВт, Швеція – 38 МВт, Китай – 30 МВт, Греція – 28 МВт [2]. В Україні встановлена потужність ВЕС в 1998 році становила 8,848 МВт [3].

У світовій вітроенергетиці є два основних напрямки розвитку:

- системна вітроенергетика, яка передбачає використання енергії вітру для промислового великомасштабного отримання електроенергії, значимого для енергетичного балансу країни;

- автономна вітроенергетика, яка використовує вітросилові установки (ВСУ) потужністю від декількох сот ват до десятків кіловат в якості джерела енергії для одного або групи конкретних споживачів.

ВЕС системної вітроенергетики можуть складатися з одного або декількох вітроприймальних пристроїв, об'єднаних єдиною системою керування та споживання. Наприклад, на Гаваях працює ВЕС потужністю 3,2 МВт з ротором діаметром 122 м і висотою залізобетонної вежі 122 м, а в Каліфорнійській пустелі споруджено ВЕС, що складається з 30 000 ВСУ, з загальною встановленою потужністю понад 2,7 МВт, яка виробляє понад 4 200 ГВт·год електроенергії на рік [4].

Малі ВЕС знаходять використання для живлення електроосвітлювальних пристроїв і приводів водяних насосів, опалення і гарячого водопостачання будинків, кондиціонування повітря в приміщеннях, опріснювання води тощо. Їм відводиться роль джерела енергії для невеликих споживачів в місцях, віддалених від систем централізованого електропостачання, а також там, де в даний час використовуються дизельні установки, які спалюють дороге цінне рідке паливо.

В Австралії, Японії, США, Канаді та Бразилії в автономній вітроенергетиці дістали великого поширення ВЕС потужністю від 30 Вт до 5 кВт для живлення апаратури зв'язку [5]. У Франції ВЕС використовуються в якості джерел енергії для маяків та бакенів, а також для живлення залізничної сигналізації. З успіхом малі ВЕС застосовуються для катодного захисту трубопроводів від корозії.

Таке підвищення інтересу до вітроенергетики зумовлене не тільки спробами вирішити питання забезпечення постійно зростаючих енергетичних потреб та економічними чинниками, але й нагальною необхідністю зменшення техногенного тиску об'єктів електроенергетики на навколишнє середовище.

Вітрова ситуація в Карпатському регіоні. При вирішенні питання можливості створення ВЕС на якихось теренах необхідно точно враховувати інтенсивність вітрів у цій місцевості, що дає змогу прийняти коректне технічне рішення.

Спираючись на накопичені статистичні дані про вітроенергетичні ресурси України [6], середньорічну швидкість вітру в даній місцевості прийнято визначати за формулою

$$V_c = \frac{1}{8760} \sum_{i=1}^n V_i t_i, \quad (1)$$

де V_i – середня швидкість вітру в i -му діапазоні швидкостей; t_i – середньорічна тривалість вітрів i -го діапазону швидкостей; n – кількість діапазонів швидкостей вітру, взятих до уваги при розрахунках.

Але використання значення V_c , встановленого за (1), у якості критерію для визначення можливості створення ВЕС у даній місцевості, як це інколи сьогодні робиться, може призвести до некоректних висновків щодо оцінки вітроенергетичного потенціалу цієї місцевості.

Для коректної оцінки енергетичного потенціалу вітрів [7] бажано користатися питомою річною ефективністю потужності вітру

$$E \approx \frac{\rho}{2} \sum_{i=1}^n V_i t_i, \quad (2)$$

або середньорічною ефективною швидкістю вітру

$$V_e = \sqrt[3]{\frac{2E}{8760\rho}}, \quad (3)$$

де ρ – густина повітря в місці, де розташована вітроелектростанція, при 760 мм рт. ст. $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$.

Спираючись на дані [6], з врахуванням міркувань викладених вище, було проведено визначення основних енергетичних характеристик вітрів V_c , V_e та E_Σ для 15 пунктів спостереження у Закарпатській, Івано-Франківській, Львівській та Чернівецькій областях, які наведено в таблиці.

Енергетичні характеристики вітрів Карпатського регіону

Місце спостереження	V_c , м/с	V_e , м/с	E_Σ , $\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{м}^2 \cdot \text{рік}}$
Славсько, Львівська обл.	2,81	4,52	551
Бережани, Тернопільська обл.	2,98	4,18	928
Львів АМСЦ	3,76	5,06	731
Турка, Львівська обл.	1,48	2,89	136
Кам'янка-Буська, Львівська обл.	2,57	4,37	471
Яворів, Львівська обл.	3,92	5,7	1047
Коломия, Івано-Франківська обл.	2,4	4,33	461
Чортків, Тернопільська обл.	3,14	4,99	703
Плаї, Закарпатська обл.	6,19	9,1	4263
Новодністровськ, Чернівецька обл.	3,18	4,24	431
Ужгород, Закарпатська обл.	2,54	3,84	320
Дрогобич, Львівська обл.	3,19	5,25	816
Стрий, Львівська обл.	2,89	5,09	742
Яремча, Івано-Франківська обл.	2,87	6,80	1782
Рава-Руська, Львівська обл.	3,44	4,78	628

Наведене вище ствердження стає очевидним при порівнянні даних, наведених у таблиці. Наприклад, середньорічні швидкості вітрів V_c в м. Стрий Львівської обл. і м. Яремчя Івано-Франківської обл. відрізняються незначно, а питомі річні ефективні потужності вітру E_Σ – відрізняються практично в 2,5 рази.

Оптимальна структура автономної ВЕС. При створенні автономних ВЕС дуже важливою проблемою є визначення їх структурної схеми та оптимізація споживання виробленої електроенергії.

Сьогодні відомо декілька типів вітроелектростанцій, основною відмінністю яких є тип використаного генератора електричного струму [8]. Найбільшого поширення набули ВЕС з асинхронним генератором, до основного недоліку яких необхідно зарахувати наявність мультиплікатора, який суттєво впливає на поріг мінімальних швидкостей вітру, при яких можлива робота станції. Крім того, треба брати до уваги, що такі ВЕС оснащуються складною механічною системою стабілізації частоти обертання, необхідної для отримання заданої якості електроенергії змінного струму.

Зважаючи на зазначене та беручи до уваги нагальну потребу використання енергії вітрів малої інтенсивності, видається доцільним використовувати безредукторні ВЕС, які виконуються на базі тихохідних електричних генераторів.

Структурна схема такої станції повинна складатися з врахуванням наявності в господарстві, для якого створюється ВЕС, споживачів електроенергії різних видів.

Найбільш раціональною схемою перетворення і споживання енергії вітру можна вважати безредукторну ВЕС, структурна схема якої показана на рис. 1. У такій станції потенційна енергія вітру за допомогою вітроколеса ВК і синхронного генератора СГ перетворюється в змінний струм, частота і напруга якого залежать від частоти обертання генератора. Випрямляч ВП перетворює її в постійний струм. Накопичування енергії здійснюється в акумуляторних батареях ЕНЕ. За допомогою інвертора ІВ постійний струм перетворюється в змінний струм стабільної частоти і напруги. Передбачається можливість живлення системи збудження ДЖСЗ генератора, якщо він має електромагнітне збудження.

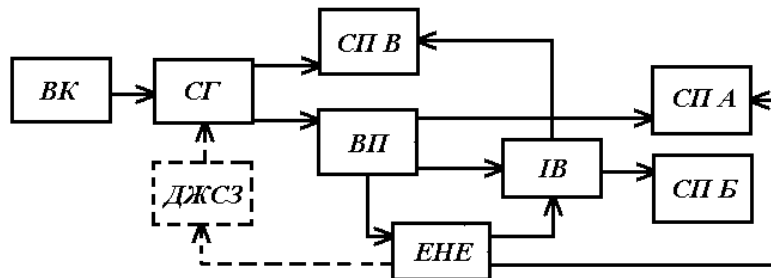


Рис. 1. Схема безредукторної ВЕС

В представленій схемі ВЕС введено диференціювання споживачів за родом споживаного струму та вимогам щодо якості електроенергії, що зменшує капітальні видатки на спорудження станції. Диференціювання споживачів за зазначеними показниками впливає з того, що в господарстві можуть існувати споживачі, які не висувають високих вимог до стабільності частоти і рівню напруги змінного струму (споживачі типу В, позначені на схемі СП В), до числа яких, наприклад, можна зарахувати нагрівальні пристрої. В господарстві можуть бути споживачі постійного струму, які не висувають високих вимог до стабільності вхідної напруги (споживачі типу А, позначені на схемі СП А). А крім того, існують споживачі з високими вимогами до якості змінного струму (споживачі типу Б, позначені – СП Б), наприклад, різного роду побутові прилади: радіо- та відеоапаратура, кондиціонери, холодильники тощо.

До числа безумовних переваг таких ВЕС можна зарахувати розширення діапазону робочих швидкостей вітру, за рахунок використання вітрів малої інтенсивності. Наприклад, враховуючи діаграми розподілу швидкостей вітру в районі м. Стрий Львівської області 1 та відповідній, до неї енергетичній діаграмі 2, зображених на рис. 2, затемнена частина діаграми 2 відображає потенційну можливість нарощування кількості енергії, що виробляється безредукторною ВЕС при зменшенні мінімальної швидкості вітру від 5 до 2,5 м/с. У цьому випадку, забезпечується збільшення кількості енергії, що виробляється ВЕС на 13 %.

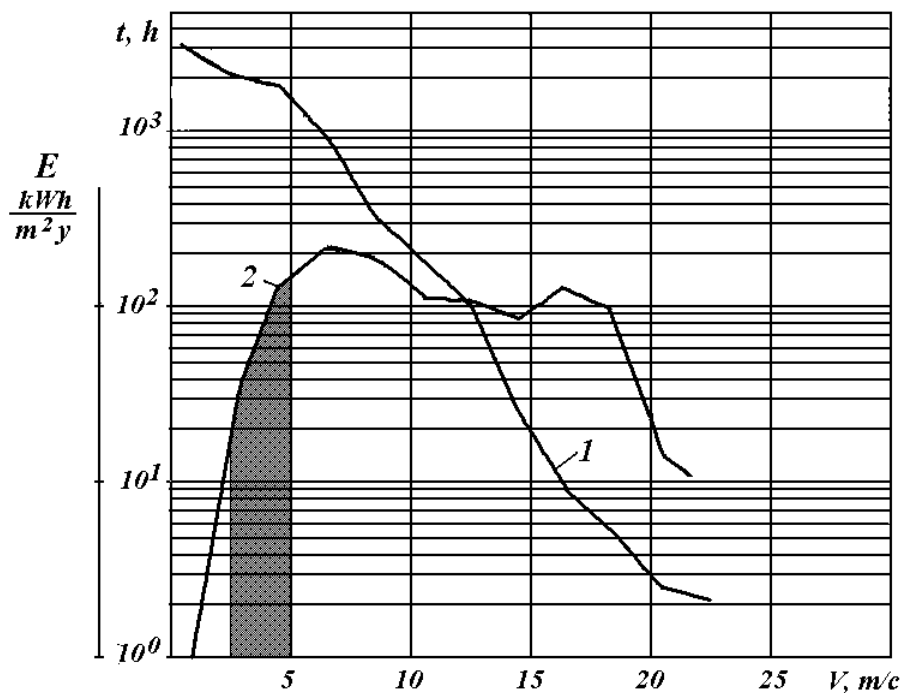


Рис. 2. Діаграми швидкості вітрів (1) та їх потенційної енергії (2) в районі м. Стрий Львівської області

Безредукторні станції мають більш високий коефіцієнт корисної дії, що пояснюється виключенням втрат, які супроводжують роботу мультиплікатора, а також відмовою від пристрою стабілізації частоти обертання вітроколеса. Відсутність мультиплікатора і стабілізатора частоти обертання вітроколеса забезпечує підвищення надійності, збільшення гарантійного терміну служби та суттєве зменшення видатків на експлуатацію.

Генератори для безредукторних ВЕС. Створення безредукторних ВЕС вимагає застосування спеціальних тихохідних генераторів електричного струму.

Беручи до уваги необхідність зменшення вартості та видатків на експлуатацію ВЕС, необхідно максимально спростити її кінематичну схему. Суттєвим внеском у вирішення цієї проблеми є виконання генератора без власних підшипників. Таке технічне рішення дозволяє уникнути від використання муфт, необхідних для сполучення генератора з вітроколесом, та зменшити масу і габарити силової частини ВЕС, яка встановлюється на вежі. Статор такого генератора монтується на нерухомій частині опорно-поворотного пристрою ВЕС, а ротор з постійними магнітами – на його обертовій частині, яка жорстко зв'язана з вітроколесом.

На погляд авторів, найбільш раціональною конструкцією генераторів для безредукторних ВЕС малої потужності є трифазні синхронні генератори зі збудженням від постійних магнітів, статор яких виконано з набору феромагнітних витих блоків, рівномірно розташованих по розточці статора, на прямолінійних частинах яких встановлені котушки неперехресної обмотки [9, 10]. Структурна схема такого генератора показана на рис. 3, а фрагмент статора торцевого генератора, розробленого і виготовленого в Спеціальному конструкторському бюро електромеханічних систем, показано на рис. 4.

З метою зменшення гальмівного моменту, зумовленого взаємодією зубчастого статора з системою збудження, генератор повинен виконуватись з відповідним співвідношенням кількості зубців якоря Z і пар полюсів системи збудження p , а також, з оптимальним співвідношенням розмірів їх робочих поверхонь.

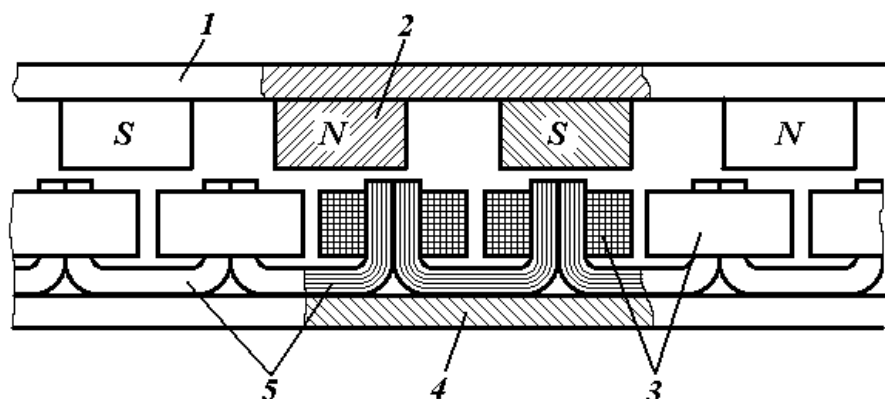


Рис. 3. Структурна схема генератора:

- 1 – магнітопровід системи збудження генератора;
 2 – полюс системи збудження, виконаний з постійного магніту;
 3 – котушки статорної обмотки; 4 – несуча частина статора;
 5 – U-подібні блоки зубчастого статора

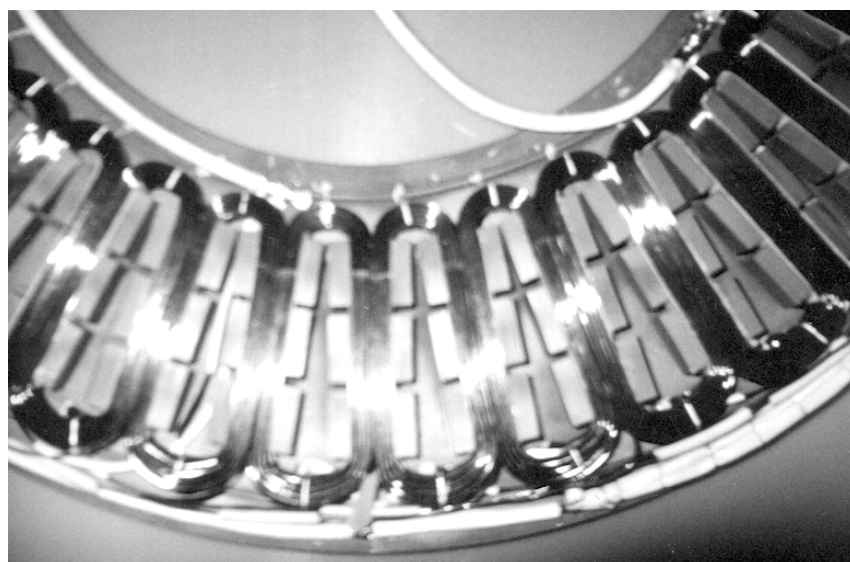


Рис. 4. Фрагмент статора торцевого генератора

Зокрема при розробці генератора для ВЕС резервного живлення Чернівецького обласного радіотелевізійного передавального центру було прийнято $Z = 36$ і $p = 22$, що створило можливість роботи генератора при мінімальній швидкості вітру 2,5 м/с.

До генератора були висунуті вимоги

- перетворення та передача електричної енергії до споживача повинно здійснюватися за схемою: генератор-випрямляч-акумуляторна батарея-інвертор-навантаження;
- потужність генератора в режимі зарядження акумулятора – не менше 6 кВт;
- напруга акумуляторної батареї резервного живлення – 24 В;
- номінальна частота обертання генератора – 140 об/хв;
- діапазон частот обертання від 20 до 160 об/хв;
- мінімальна швидкість вітру, при якій починає обертатися вітроколесо – 2,5 м/с.

На рис. 5 показано зовнішні характеристики генератора при частотах обертання – 50, 100, і 140 об/хв, які були отримані під час експериментальних досліджень. Аналіз цих

характеристик показує, що зарядження акумуляторної батареї на 24 В починається вже при частоті обертання вітроколеса 50 об/хв, при частоті обертання 100 об/хв зарядний струм перевищує 200 А, а при частоті обертання 140 об/хв – сягає 280 А. Статор виконано з можливістю перекомутації кількості котушок в паралельних гілках обмотки, що забезпечує можливість використання генератора з акумуляторними батареями на напругу 36 і 48 В. У разі необхідності генератор можна виконати на будь-яку напругу, що реалізується шляхом простої зміни обмоткових даних генератора без зміни його конструкційних параметрів.

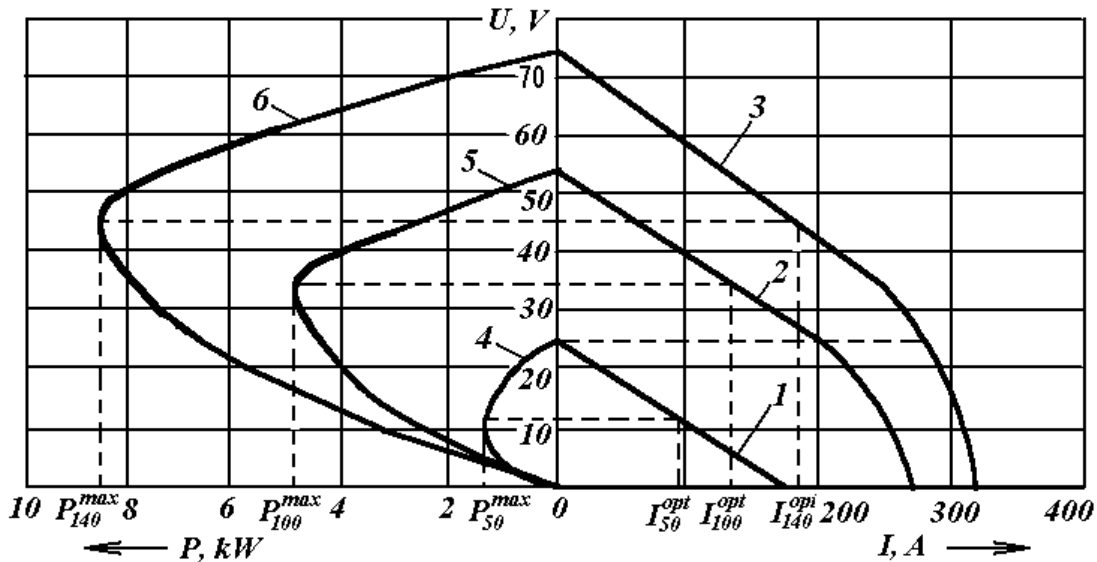


Рис. 5. Характеристики генератора:
1, 2, 3 – зовнішні; 4, 5, 6 – навантажувальні

Тривала дослідна експлуатація ВЕС підтвердила високу надійність генератора в складних кліматичних умовах.

Висновки. За результатами виконаних досліджень і проведених конструкторських розробок можна зробити висновки

- використання автономних вітроелектростанцій в Карпатському регіоні дозволить вирішити проблеми енергозабезпечення малих підприємств і населених пунктів, віддалених від централізованих систем електропостачання;
- суттєва відмінність вітрових ситуацій в регіоні вимагає ретельної енергетичної оцінки вітрів при вирішенні питань доцільності спорудження ВЕС в даній місцевості;
- з метою зменшення капітальних видатків на спорудження і витрат на експлуатацію, структура споруджуваної ВЕС повинна визначатися з врахуванням існуючих потреб конкретних споживачів, які будуть жититися від станції;
- використання безредукторних ВЕС суттєво збільшує продуктивність автономних станцій, споруджуваних в Карпатському регіоні;
- розроблені тихохідні генератори дозволяють спростити конструкцію автономних ВЕС та зменшити видатки на їх експлуатацію.

1. Наиболее часто задаваемые вопросы об энергии ветра // American Wind Energy Assotiation. – К., 1998. – 18 с. 2. Energy and sustainable development // Committee on new and renewable sources for energy and on energy for development. Second session. – New York, 12–23

February 1996. 3. Дерзкий В.Г. Аналитический прогноз развития мировой ветроэнергетики // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 1. – С. 53–56. 4. Kucowski J., Landyn D., Przekwas M. Energetyka a ochrona środowiska. – Warszawa, 1997. – 484 s. 5. Ветроэнергетические установки: мировой рынок и цены. – М., 1997. – 118 с. 6. Кінаш Р., Бурнаєв О. Вітрове навантаження і вітроенергетичні ресурси в Україні. – Львів, 1998. – 1152 с. 7. Чучман Ю., Пуцило В., Замська С. Технічні та техногенні аспекти використання вітроелектростанцій в Карпатському регіоні // Міжнар. форум конф. Єврорегіонів “Мир та безпека”. – Ів.-Франківськ, 11–13 жовтня 2000; Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Сер. Енергетика. – Ів.-Франківськ, 2000. – Вып.37. – Т. 9. – С. 59–65. 8. Ветроэнергетика / Под ред. Д.Де Рензо. – М., 1982. – 272 с. 9. Чучман Ю. Використання досвіду створення моментних двигунів при розробці генераторів для вітроелектростанцій // Доп. 2-ї Міжнар. наук.-практ. конф. “Управління енерговикористанням”. – Львів, 3 червня 1997. 10. Черепаняк М. Генератор для вітроелектростанцій // Доп. 2-ї Міжнар. наук.-практ. конф. “Управління енерговикористанням”. – Львів, 3 червня 1997.

УДК 621.314

М.А. Яцун

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра ЕМА

ПРОСТОРОВІ ГАРМОНІКИ МРС СИМЕТРИЧНОЇ КЛІТКИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

© Яцун М.А., 2001

Визначені основна і вищі просторові гармоніки зубцевого порядку МРС симетричної короткозамкненої клітки ротора асинхронного двигуна

First and higher tooth order space harmonic of the magnetomotive force for the symmetrical squirrel-cage rotor winding has been determined

У відомій літературі розглянуті вищі зубцеві просторові гармоніки магнітної індукції і електрорушійних сил при синусоїдній формі магніторушійної сили (МРС), які зумовлені розкриттям пазів. Проте не враховані вищі гармоніки того ж порядку, які зумовлені розподілом обмотки, зокрема стрижнів ротора.

Визначимо магніторушійну силу клітки ротора асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором з урахуванням розподілу стрижнів по колу ротора у випадку симетричного навантаження за умови, що МРС обмотки статора при неробочому ході змінюється з часом (t) за синусоїдним законом і на один полюс визначається виразом $F_0 = (0,45/p)mI_0w_1K_{061}\sin(\omega t + \pi x/\tau)$, де відлік координати x (кута $\alpha = \pi x/\tau$) береться від осі фази А зі струмом $i_0 = I_0\sqrt{2}\sin\omega t$; p , m , w_1 – кількість відповідно пар полюсів, фаз і витків у фазі статора; K_{061} і τ – відповідно обмотковий коефіцієнт і полюсний крок; $\omega = 2\pi f$ – колова частота; f – частота змінного струму. Стан магнітної системи будемо враховувати коефіцієнтом насичення K_n , а зубчастість статора і ротора – коефіцієнтом повітряного проміжку K_δ .