

Отже, застосування цього методу водопоглинання дає змогу з високою точністю оцінювати ступінь гартування в будь-якій точці загартованої ізоляційної деталі підвісних високовольтних ізоляторів і таким способом оцінювати їхню якість.

1. Казанский М.С. Измерение напряжений в листовых закаленных и отжженных стеклах // *Стекольная промышленность*. 1940. № 5. С.15–19. 2. Богуславский И.А. Высокопрочные закаленные стекла. М., 1969. 3. Loodin Olaf. *Sprechsaal fur Keramik, Glass, Email, Silikate* // 17-71.104. Jahrgang. S.709–726. 4. АС 1347011 СССР. Способ определения степени закалки стеклянных изделий сложной формы / В.И.Качалин, С.И.Дякивский, Коринкевич С.В. и др. // *Открытия. Изобрет.* 1987. № 4. 5. Дяківський С.І., Качалін В.І, Василюк М.С. Метод оцінки напруг у загартованих скляних виробх складної конфігурації // *Вісн. Львів. політехн. ін-ту*. 1991. № 250. С.98–100. 6. Воробьев В.А. *Лабораторный практикум по общему курсу строительных материалов* // Гос. изд. лит. по строительным материалам. М. 1955. С.11–12. 7. Barson J.M. *Fracture of Tempered Glass* // *J. Amer. Ceram. Soc.* 1969. 51. № 12. P.75–78.

УДК 621.3.018.3

Кенс Ю.А.

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра ЕМС

ВИЩІ ГАРМОНІКИ У БАГАТОФАЗНІЙ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ БЕЗ НУЛЬОВОГО ПРОВОДУ

© Кенс Ю.А., 2000

Розглянуто розрахунок та аналіз вищих гармонік у багатофазних електричних мережах без нульового проводу в загальному випадку – нелінійне та несиметричне навантаження живиться від несиметричної ЕРС з вищими гармоніками

В Україні та інших країнах СНД електромережі 6...35 кВ працюють, як правило, без нульового проводу - з малими струмами замикань на землю. За таких умов виникають певні особливості в режимах роботи трифазного нелінійного навантаження. Особливості спектрів струмів у багатофазній електричній мережі з нульовим проводом і нелінійним навантаженням розглянуті в [1]. Коли нелінійне навантаження живиться від багатофазної мережі без нульового проводу, фазні напруги і струми навантаження всіх фаз взаємно залежні між собою, а тому залежні і їх гармонічні спектри.

У відомих публікаціях [2–4] розглянуті однофазні електромережі або багатофазні з нульовим проводом, від яких живиться нелінійне навантаження. У [5] розглянуто багатофазні системи без гармонічного аналізу отриманих результатів.

Доцільність визначення загальних особливостей спектрів, зокрема фазних напруг на нелінійному навантаженні зумовлена, наприклад, необхідністю аналізу режимів роботи захистів конденсаторних батарей 6...35 кВ від пошкоджень окремих конденсаторів [6], а також захистів потужних синхронних генераторів від виткових коротких замикань обмотки статора [7, 8].

Розглянемо n -фазну електромережу, яка складається з джерел ЕРС e , поздовжніх провідностей мережі Y_M , нелінійних навантажень Y_N , з'єднаних у зірку без нульового проводу (рис.1). Оскільки ємнісні струми в мережах без нульового проводу (6...35 кВ), переважно, значно менші від струмів навантаження, то ємнісні провідності мережі у цій роботі не враховуються. Замінивши провідності Y_M , Y_N еквівалентною провідністю Y , отримаємо такі рівняння:

$$i_q = i_{qN}; \quad (1)$$

$$u_q = u_{qM} + u_{qN}; \quad (2)$$

$$u_N = u_{NN}, \quad (3)$$

де $q = 1, 2, \dots, n$.

В усталеному режимі багатофазної нелінійної системи (рис.1) за періодичних ЕРС живлення e струми i та напруги u , u_N теж періодичні і здебільшого можна розкласти в ряд Фур'є як подвійну суму симетричних гармонічних складових [9] (винятком є режими, під час яких наявні "неканонічні гармоніки", амплітудна, частотна модуляція сигналів тощо).

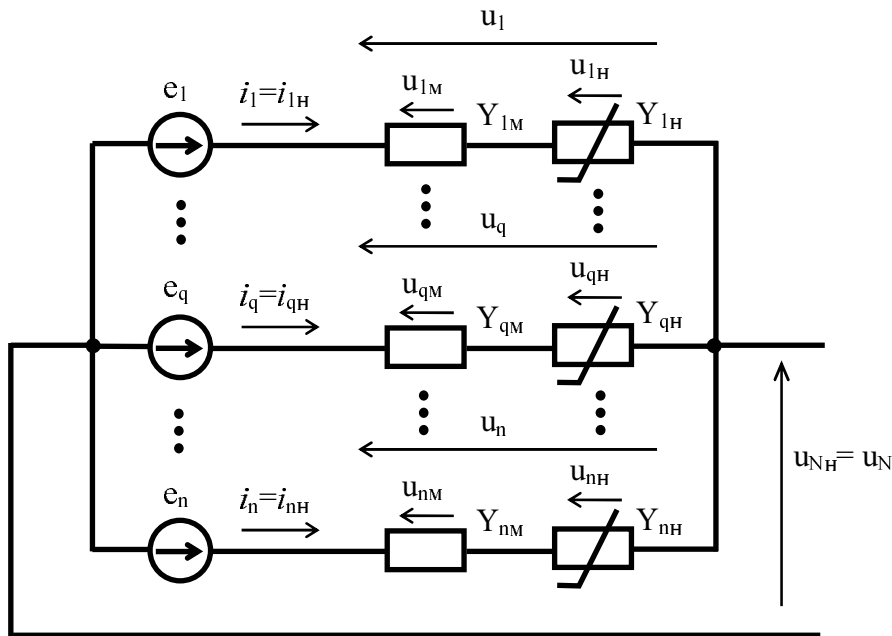


Рис.1. Багатофазна електромережа без нульового проводу.

Отже, у відповідності з [9] можна отримати вираз для миттєвого значення будь-якого періодичного параметра q -ї фази n -фазної системи A_q , як його гармонічний розклад у ряд Фур'є, де кожна гармонічна складова є сумою n симетричних складових

$$A_q = A_{qП} + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=1}^n A_{kl} \sin(k\omega t + \psi_{kl} + \frac{2\pi l(1-q)}{n}), \quad (4)$$

де $A_{qП}$ – постійна складова; l – номер послідовності (симетричної складової); A_{kl} – амплітуда; $n = 3, 4, 5, \dots$ – загальна кількість фаз; ψ_{kl} – фаза; ω – колова частота основної гармоніки; q – номер фази; k – номер гармоніки.

У відповідності з [9] за нумерації фаз від 1 до n і прямого чергування векторів параметра A вектор 2-ї фази відстає від 1-ї, 3-ї – від 2-ї тощо. За зворотного чергування фаз

вектор 2-ї фази випереджує 1-шу, 3-ї – 2-гу тощо. Вираз (4) відповідає положенням [10]: коли $l=1$ (перша послідовність) та $q=2$, то вектор $\dot{A}_{2(1)}$ зсунутий на кут $(-\frac{2\pi}{n})$ від вектора $\dot{A}_{1(1)}$ і т. д. – себто маємо пряме чергування фаз; якщо $l=n-1$ (передостання послідовність) і $q=2$, то вектор $A_{2(n-1)}$ зсунутий на кут $\frac{2\pi(n-1)(1-2)}{n} = \frac{2\pi}{n} \cdot 2\pi$ від вектора $A_{1(n-1)}$ – себто маємо обернене чергування фаз; коли $l=n$ (остання послідовність), то вектори всіх фаз збігаються між собою – тобто є векторами так званої нульової послідовності. За інших значень l отримують системи послідовностей з переміжним порядком чергування фаз, причому, якщо n і l мають спільний найбільший дільник p , то отримуємо систему послідовностей, яка кратна системі з кількістю фаз $\frac{n}{p}$.

Вираз (4) можна записати, виділивши із суми окремо n -у (нульову) послідовність

$$A_q = A_{q\Pi} + \sum_{k=1}^{\infty} A_{kn} \sin(k\omega t + \psi_{kn}) + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{n-1} A_{kl} \sin(k\omega t + \psi_{kl} + \frac{2\pi l(1-q)}{n}). \quad (5)$$

У відповідності з рис.1 можна записати рівняння рівноваги струмів (за першим законом Кірхгофа) і напруг (за другим законом Кірхгофа) за замкнутим контуром для q -ї фази багатофазної системи без нульового проводу

$$\sum_{q=1}^n i_q = 0; \quad (6)$$

$$e_q = u_q + u_N. \quad (7)$$

Отримавши внаслідок розрахунку усталеного режиму періодичні значення e_q , u_q , u_N , розклавши їх у ряд Фур'є, в якому виділені члени окремих послідовностей гармонік згідно з (5), рівняння (7) можна записати так:

$$\begin{aligned} & E_{q\Pi} + \sum_{k=1}^{\infty} E_{kn} \sin(k\omega t + \psi_{knE}) + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{n-1} E_{kl} \sin(k\omega t + \psi_{klE} + \frac{2\pi l(1-q)}{n}) = \\ & = U_{q\Pi} + \sum_{k=1}^{\infty} U_{kn} \sin(k\omega t + \psi_{knU}) + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{n-1} U_{kl} \sin(k\omega t + \psi_{klU} + \frac{2\pi l(1-q)}{n}) + \\ & + U_{N\Pi} + \sum_{k=1}^{\infty} U_{Nk} \sin(k\omega t + \psi_{knN}). \end{aligned} \quad (8)$$

З (8) впливає рівність окремих гармонічних складових відповідних послідовностей і постійних величин лівої і правої частин рівняння:

$$E_{q\Pi} = U_{q\Pi} + U_{N\Pi}; \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} E_{kn} \sin(k\omega t + \psi_{knE}) = \sum_{k=1}^{\infty} U_{kn} \sin(k\omega t + \psi_{knU}) + \sum_{k=1}^{\infty} U_{Nk} \sin(k\omega t + \psi_{knN}); \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{n-1} E_{kl} \sin(k\omega t + \psi_{klE} + \frac{2\pi l(1-q)}{n}) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{n-1} U_{kl} \sin(k\omega t + \psi_{klU} + \frac{2\pi l(1-q)}{n}). \quad (11)$$

Із співвідношень (9)–(11) випливають такі залежності:

$$U_{N\Pi} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n (E_{q\Pi} - U_{q\Pi}); \quad (12)$$

$$u_{Nk} = e_{kn} - u_{kn}; \quad (13)$$

$$u_{kl} = e_{kl}; \quad (14)$$

$$u_{Nk} = E_{kn} \sin(k\omega t + \psi_{knE}) - U_{kn} \sin(k\omega t + \psi_{knU}); \quad (15)$$

$$U_{kl} \sin(k\omega t + \psi_{k/U} + \frac{2\pi l(1-q)}{n}) = E_{kl} \sin(k\omega t + \psi_{k/E} + \frac{2\pi l(1-q)}{n}), \quad (16)$$

де $l = 1, 2, \dots, n-1$.

З (14), (16) випливає, що

$$U_{kl} = E_{kl} \text{ і } \psi_{k/U} = \psi_{k/E}. \quad (17)$$

Отже, багатофазна система (рис.1) у відповідності з (12)–(17) має такі властивості:

1) значення постійної складової напруги зміщення нейтралі $U_{N\Pi}$ дорівнює середньому арифметичному значенню різниць постійних складових ЕРС живлення $E_{q\Pi}$ і фазних напруг $U_{q\Pi}$;

2) будь-яка k -та гармоніка напруги зміщення нейтралі u_{Nk} дорівнює різниці n -ї (нульової) послідовності k -ї гармоніки відповідно ЕРС живлення e_{kn} і фазної напруги u_{kn} ;

3) будь-яка l -та послідовність (крім n -ї нульової) k -ї гармоніки фазної сумарної напруги u_{kl} дорівнює відповідній послідовності такої ж гармоніки ЕРС живлення e_{kl} .

З (12)–(17) випливають особливості режиму роботи схеми (рис.1) під час дії симетричної системи фазних ЕРС e на симетричну систему нелінійних фазних провідностей. За аналогією з трифазними системами [9] для будь-якої k -ї гармоніки зсув за фазами двох суміжних фазних $q+1$ і q -ї фаз ЕРС n -фазної симетричної системи становить у відповідності до (11)

$$\Delta\varphi_k = \varphi_{(q+1)k} - \varphi_{(q)k}, \quad (18)$$

де $\varphi_{(q+1)k}$, $\varphi_{(q)k}$ – аргументи векторів k -ї гармоніки відповідно $(q+1)$ -ї і q -ї фаз. Приймавши за лінію відліку кутів вектор 1 -ї фази основної (першої) гармоніки ЕРС, тобто при $\psi_{11E} = 0$, маємо у відповідності з (11)

$$\varphi_{(q+1)k} = \frac{2\pi l(1-(q+1))}{n} \cdot k; \quad (19)$$

$$\varphi_{(q)k} = \frac{2\pi l(1-q)}{n} \cdot k. \quad (20)$$

Тоді, враховуючи (18), матимемо для симетричної системи ЕРС для будь-якої k -ї гармоніки

$$\Delta\varphi_k = -\frac{2\pi lk}{n}, \quad (21)$$

де $l = 1, 2, \dots, n-1$ – номер послідовності; $l \neq n$, тому що n -на нульова послідовність ЕРС не викликає струмів у багатофазній системі без нульового проводу; k – номер вищої гармоніки ($k = 2, 3, 4, 5, 6, 7, \dots$); n – кількість фаз багатофазної системи ($n = 3, 4, 5, \dots$ – для системи без нульового проводу).

Треба врахувати, що у відповідності з (21) пряме чергування фаз матиме місце, коли вектор $\dot{E}_{(q+1)k}$ відстає від вектора $\dot{E}_{(q)k}$, а зворотне – навпаки, коли $\dot{E}_{(q+1)k}$ випереджує $\dot{E}_{(q)k}$ на кут $\frac{2\pi}{n}$. Можна записати для чергування фаз:

- прямого

$$\Delta\varphi_{\text{кпр}} = -m2\pi - \frac{2\pi}{n}; \quad (22)$$

- зворотного

$$\Delta\varphi_{\text{кзв}} = -m2\pi + \frac{2\pi}{n}; \quad (23)$$

- нульового

$$\Delta\varphi_{\text{к0}} = -m2\pi, \quad (24)$$

де $m = 1, 2, 3, \dots$

Враховуючи (21)–(24), матимемо для чергування фаз:

- прямого

$$m = \frac{kl - 1}{n}; \quad (25)$$

- зворотного

$$m = \frac{kl + 1}{n}; \quad (26)$$

- нульового

$$m = \frac{kl}{n}; \quad (27)$$

- переміжного

$$m \neq \frac{kl \pm 1}{n}; \frac{kl}{n}. \quad (28)$$

Для трифазної системи кількість послідовностей дорівнює 3 (1-ша – пряма ; 2-га – зворотна і 3-тя – нульова), тому переміжне чергування фаз для вищих гармонік відсутнє.

Враховуючи, що у відповідності з (9), (10) постійна складова E_{qp} багатофазної системи без нульового (зворотного) проводу не спричиняє струмів у нелінійних фазних провідностях навантаження, а призводить лише до появи відповідної складової у напрузі u_N між нейтраліями ЕРС і навантаження, надалі розглянемо симетричну n -фазну систему, фазні ЕРС живлення якої мають у своєму складі першу з прямим чергуванням фаз і вищі гармоніки, кожна з яких є симетричною системою векторів $1 \div (n)$ – послідовностей. Для ЕРС e_{qc} будь-якої q -ї фази такої симетричної системи, коли $l = 1$ і $\psi_{klE} = 0$:

$$e_{qc} = \sum_{k=1}^{\infty} E_k \sin k(\omega t + \frac{2\pi(1-q)}{n}). \quad (29)$$

Очевидно, що в цьому випадку у виразі (29) є складові різного чергування фаз залежно від номера гармоніки k . Вираз (29) перепишемо, виділивши окремо складові нульової послідовності e_{q0} і решту ненульових складових e_{qp} , кожна з яких становить симетричну систему з n -векторів

$$e_{qc} = e_{qp} + e_{q0}, \quad (30)$$

де

$$e_{qp} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq mn}}^{\infty} E_k \sin k(\omega t + \frac{2\pi(1-q)}{n}); \quad (31)$$

$$e_{q0} = \sum_{k=mn}^{\infty} E_k \sin k(\omega t + \frac{2\pi(1-q)}{n}), \quad (32)$$

де $m = 1, 2, 3, \dots$; $n = 3, 4, 5, \dots$

З (32) видно, що

$$e_{q0} = \sum_{k=n}^{\infty} E_{mn} \sin mn\omega t, \quad (33)$$

де k, m, n такі ж, як у виразі (32).

Аналогічно до (30) можна записати вирази для фазних напруг на еквівалентних нелінійних провідностях

$$u_q = u_{qp} + u_{q0}, \quad (34)$$

і, враховуючи (30), матимемо

$$e_{qp} + e_0 = u_{qp} + u_0 + u_N. \quad (35)$$

У відповідності з (35) та рис.1 можна скласти схему для ЕРС і напруг багатозазної системи без нульового проводу (рис.2,а). Причому таку схему можна зобразити як еквівалентну, об'єднавши між собою точки однакових потенціалів усіх фаз відповідно ЕРС e_0 і напруг u_0 (рис.2,б).

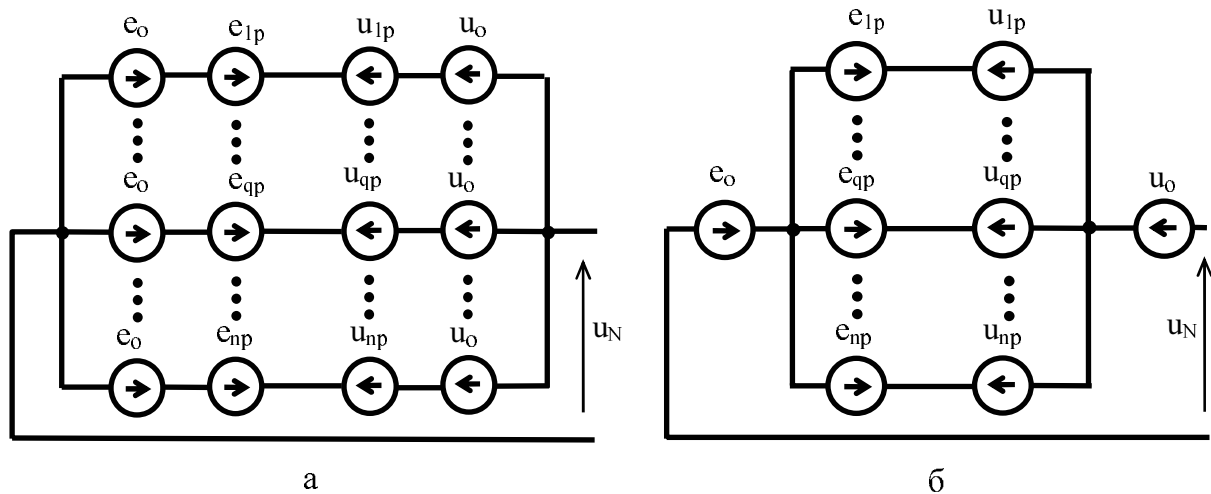


Рис.2. Схеми для ЕРС і напруг багатозазної мережі без нульового проводу.

На підставі (35) можна скласти n рівнянь, покладаючи $q = 1, 2, \dots, n$. Додавши всі праві і ліві частини окремо і прирівнявши їх, отримаємо

$$e_0 = u_0 + u_N, \quad (6)$$

тому що $\sum_{q=1}^n e_{qp} = \sum_{q=1}^n u_{qp} = 0$.

Підставивши значення u_0 з (36) в (35), отримаємо

$$e_{qp} = u_{qp}. \quad (37)$$

Використовуючи співвідношення (29-37), можна показати, що в напрузі зміщення нейтралі U_N для симетричної схеми, коли система ЕРС e та еквівалентних провідностей – симетрична, відсутні гармоніки несинфазних (ненульових) складових ЕРС живлення e_{qp} (31), тобто

$$u_N = \sum_{k=mn}^{\infty} U_{Nk} \sin(k\omega t + \varphi_{Nk}), \quad (38)$$

де $m = 1, 2, 3, \dots$; $n = 3, 4, 5, \dots$

Якщо виконується рівняння (38), то, очевидно, що і всі фазні напруги u_q і струми i_q у симетричній схемі – симетричні.

Для окремих випадків, коли спадами напруги на поздовжніх провідностях мережі Y_M можна нехтувати, то фазні напруги u_n на симетричному навантаженні, яке живиться від потужного джерела симетричних ЕРС e , також симетричні. Такі режими властиві, наприклад, трансформаторам напруги, струми в яких практично не впливають на напругу живлячої мережі.

Очевидно, що за співвимірних лінійних поздовжніх провідностей мережі Y_M і нелінійних провідностей навантаження Y_n навіть за умови симетричних синусоїдних ЕРС живлення фазні напруги навантаження u_n будуть несинусоїдними. Неважко показати, що для симетричної схеми у цьому випадку несинусоїдні фазні напруги навантаження u_n і фазні струми i_n будуть симетричними.

Висновки

1. Застосування методів симетричних складових і розкладу в ряд Фур'є до періодичних функцій напруг дозволяє визначити співвідношення між частотними спектрами ЕРС джерела живлення, спадів напруг в елементах схеми та напруги зміщення нейтралі багатofазної нелінійної системи без нульового проводу.

2. У симетричних багатofазних нелінійних системах, сполучених у зірку без нульового проводу поздовжні спади напруг у відповідних елементах схеми, міжфазні напруги та фазні струми – симетричні. У напрузі зміщення нейтралі таких схем наявні вищі гармоніки, частота яких кратна частотам гармонік ЕРС живлення, помноженим на кількість фаз багатofазної системи.

1. Кенс Ю.А., Жураховский А.В. *Дискусии. Высшие гармоники в трехфазных цепях* // *Электричество*. 1995. № 5. С.68–74. 2. Арилага Дж., Брэдли Д., Боджер П. *Гармоники в электрических системах*. М., 1990. 3. Иванов В.С., Соколов В.И. *Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий*. М., 1987. 4. Крогерис А.Р., Рашиевц К.К., Трейманис Э.П. и др. *Мощность переменного тока*. Рига, 1993. 5. Кузнецов В.Г., Григорьев А.С., Данилюк В.Б. *Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях*. К., 1992. 6. Пат. 15482А України. *Пристрій захисту конденсаторної батареї* / Ю.А.Кенс, А.В.Журахівський, В.Г.Гапанович. Опубл. 30.01.98. 7. Федосеев А.М. *Релейная защита электрических систем: Учеб. для вузов*. М., 1976. 8. Силаева Т.А., Наза-ров Ю.Г. *Способ защиты синхронных генераторов от*

виткових замкнень в обмотке статора // *Электричество*. 1975. № 4. С.12–16. 9. Нейман Л.Р., Калантаров Т.Л. *Теоретические основы электротехники в трех частях. Ч.2. Теория цепей переменного тока: Учеб. для вузов*. М., 1959. 10. Градштейн И.С., Рыжик И.М. *Таблицы интегралов, сум, рядов и производений*. М., 1971. 11. Корн Т., Корн Г. *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. М., 1970.

УДК 621.311:621.313.3

Копчак Б.Л., Шуфлат А.Р.
ДУ “Львівська політехніка”, кафедра ЕАП,
“Львівенергоналадка”

ДОСЛІДЖЕННЯ І ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОГО РЕЖИМУ ПІДМИКАННЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДО МЕРЕЖІ

© Копчак Б.Л., Шуфлат А.Р., 2000

Розроблено математичну модель вітроенергетичної установки, за допомогою якої вибрано раціональний режим підмикання асинхронного генератора до мережі при обмеженні пускового струму на заданому рівні.

Діапазон одиничної потужності сучасних вітроенергетичних установок (ВЕУ) надзвичайно широкий 0,2...4000 кВт. Характеристики і техніко-економічні показники ВЕУ значно відрізняються залежно від:

- розрахункової потужності;
- діапазону швидкості повітряного потоку;
- типу вітродвигуна і принципу керування ним;
- типу електричного генератора (ЕГ), системи його збудження і керування;
- режиму роботи і характеру навантаження електроустановок.

На підставі статистичних даних основу сучасної вітроенергетики становлять ВЕУ, які працюють паралельно з енергосистемою [1]. У цих умовах, оскільки значення напруги на затискачах ЕГ і його електрична частота задаються мережею, можна суттєво понизити вимоги до керованості ЕГ. Тобто вибір ЕГ здійснити за такими критеріями: високою надійністю і економічністю, мінімальними габаритами і масою, мінімальною вартістю виробництва і експлуатації. Таким ЕГ є асинхронний генератор (АГ) з короткозамкненим ротором. В Україні об'єднанням “Південмаш” виготовляються і успішно експлуатуються (зокрема в районі Східниця, Львівська область) ВЕУ з вітротурбіною типу USW56-100 і асинхронним генератором типу АГВ280М40М2, потужністю 107,5 кВт. Підмикання АГ до мережі здійснюється в момент досягнення ним швидкості, близької до синхронної, а його збудження відбувається за рахунок споживання реактивної енергії з мережі.