

## Частотні характеристики високовольтних подільників напруги

*Розглянуто особливості частотних характеристик високовольтного подільника напруги, обумовлені неідентичністю структурних елементів його високовольтного плеча.*

*Рассмотрены особенности частотных характеристик высоковольтного делителя напряжения, обусловленные неидентичностью структурных элементов его высоковольтного плеча.*

Введення в дію в Україні та СНД ГОСТ 13109-97 "Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения" висуває високі вимоги до точності вимірювань гармонічних складових напруги, імпульсних перенапруг в реальних високовольтних електричних мережах, в яких застосовувані відомі електронні прилади визначення якості електроенергії передбачає їхнє підключення через відповідні трансформатори та подільники напруги [3]. Дослідження [1] показують, що звичайні високовольтні трансформатори напруги спотворюють її вищі гармонічні складові та зовсім непридатні для трансформації імпульсних напруг.

Для повноцінного масштабного перетворення напруги високовольтних електричних мереж до рівня вхідних напруг приладів визначення якості електроенергії подільники напруги повинні мати особливі властивості по стабільності масштабного перетворення напруги в широкому діапазоні частот [1]. Такими є, наприклад, подільники напруги з резистивно-ємнісними елементами [6]. Постановка питання про частотні характеристики таких подільників напруги [2] показала важливість впливу на них так званої неідентичності  $R, C$  — параметрів високовольтного плеча.

В літературі з дослідження високовольтних подільників напруги [8] значення опорів та ємностей кола провідних елементів, як правило, приймаються ідентичними, або такими, що змінюються за заданим законом. Насправді, здійснення і того, й іншого на практиці може бути забезпечено з визначеним рівнем точності щодо підбору елементів. Крім того, навіть у випадку "ідеального" підбору елементів значення їх опорів та ємностей можуть змінитися під дією зовнішніх умов чи у часі. У зв'язку з цим виникає необхідність розгляду характеристик високовольтного плеча подільника з урахуванням, у загальному випадку, неідентичності його складових. Такий підхід до подільників напруги є необхідним не тільки для коректного ви-

значення їхніх параметрів, але і дозволяє знайти особливості частотних характеристик кіл резистивно-ємнісних елементів, у тому числі кіл елементів високовольтної ізоляції.

У запропонованій роботі виконано дослідження впливу неідентичності елементів високовольтного плеча подільника напруги з послідовно-паралельним з'єднанням елементів на його частотні характеристики.

Розглянемо високовольтне плече подільника змішаного типу у вигляді послідовного кола, що містить  $n$  паралельно з'єднаних резистивних і ємнісних елементів  $R_i, C_i$  (рис. 1, де  $r, c$  — елементи низьковольтного плеча подільника).

Така схема заміщення подільника застосована в області помірних частот, а також у випадку незначної дії розподілених ємнісних та активних струмів витoku (зокрема, при застосуванні регулювання розподілення електричного поля в ізоляційних конструкціях [5]).

При перетворенні послідовно-паралельного з'єднання елементів  $R_i, C_i$  у схему послідовного з'єднання  $r_i, x_i$  (рис. 2) використовуються співвідношення [7]

$$\begin{aligned} r_i &= R_i (\omega C_i)^{-2} \left[ R_i^2 + (\omega C_i)^{-2} \right]^{-1}; \\ x_i &= R_i^2 (\omega C_i)^{-1} \left[ R_i^2 + (\omega C_i)^{-2} \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Вводячи виражені у відносних одиницях, коефіцієнти  $\beta_i, \alpha_i$ , що враховують відхилення параметрів  $R_i, C_i$  від їх середніх значень  $R_0, C_0$ , відповідно, маємо

$$R_i = R_0(1 + \beta_i), \quad C_i = C_0(1 + \alpha_i), \quad (2)$$

$$\text{де } R_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i, \quad C_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i.$$

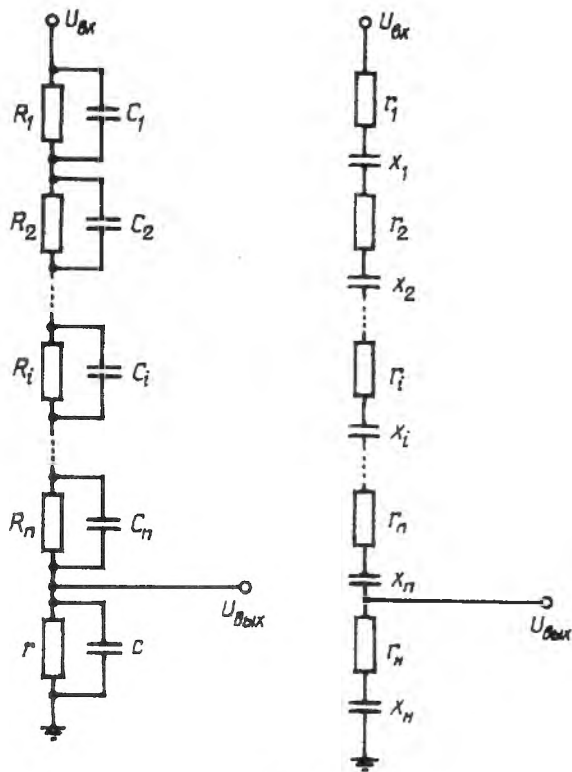


Рис. 1, 2

Вирази (1) при підстановці (2) перетворюються до вигляду

$$r_i = \frac{R_0 (1 + \beta_i)}{1 + \omega^2 R_0^2 C_0^2 (1 + \beta_i)^2 (1 + \alpha_i)^2}; \quad (3)$$

$$x_i = \frac{\omega R_0^2 C_0 (1 + \beta_i)^2 (1 + \alpha_i)}{1 + \omega^2 R_0^2 C_0^2 (1 + \beta_i)^2 (1 + \alpha_i)^2}.$$

Позначимо  $r_i = r_0 + \Delta r_i$ ;  $x_i = x_0 + \Delta x_i$ , де  $r_0 = \frac{R_0}{1 + \omega^2 R_0^2 C_0^2}$  та  $x_0 = \frac{\omega R_0^2 C_0}{1 + \omega^2 R_0^2 C_0^2}$  відповідають значенням схеми заміщення (рис. 2), знайденими за середніми значеннями  $R_0$ ,  $C_0$ , а  $\Delta r_i$  та  $\Delta x_i$  становлять

$$\Delta r_i = \frac{R_0 (1 + \beta_i)}{1 + \omega^2 R_0^2 C_0^2 (1 + \beta_i)^2 (1 + \alpha_i)^2} - \frac{R_0}{1 + \omega^2 R_0^2 C_0^2}; \quad (4)$$

$$\Delta x_i = \frac{\omega R_0^2 C_0 (1 + \beta_i)^2 (1 + \alpha_i)}{1 + \omega^2 R_0^2 C_0^2 (1 + \beta_i)^2 (1 + \alpha_i)^2} - \frac{\omega R_0^2 C_0}{1 + \omega^2 R_0^2 C_0^2}.$$

Підсумовуючи значення параметрів елементів схеми заміщення для активного і реактивного опорів високовольтного плеча подільника, одержимо

$$R_{ВП} = nr_0 + \sum_{i=1}^n \Delta r_i; \quad X_{ВП} = nx_0 + \sum_{i=1}^n \Delta x_i. \quad (5)$$

Подамо вирази  $\Delta r_i$ ,  $\Delta x_i$  (4) у вигляді, що містить лінійні за  $\alpha_i$  та  $\beta_i$  члени, а також додаткові члени

$$\Delta r_i = r_0 (A\alpha_i + B\beta_i + D_i), \quad \Delta x_i = x_0 (E\alpha_i + F\beta_i + G_i). \quad (6)$$

Виконавши необхідні перетворення у (4) та позначивши  $\omega R_0 C_0$  через  $\gamma$ , одержимо

$$A = -F = -2 \frac{\gamma^2}{1 + \gamma^2}; \quad B = E = \frac{1 - \gamma^2}{1 + \gamma^2};$$

$$D_i = \frac{\gamma^2 (T_i + \gamma S_i)}{(1 + \gamma^2) [1 + \gamma^2 (1 + \beta_i)^2 (1 + \alpha_i)^2]};$$

$$G_i = \frac{\beta_i^2 + 2\alpha_i \beta_i + \alpha_i \beta_i^2 + \gamma^2 (P_i + \gamma^2 Q_i)}{(1 + \gamma^2) [1 + \gamma^2 (1 + \beta_i)^2 (1 + \alpha_i)^2]};$$

де

$$T_i = -(6\alpha_i \beta_i + 6\alpha_i \beta_i^2 + 2\alpha_i \beta_i^3 + \alpha_i^2 + 3\alpha_i^2 \beta_i + 3\alpha_i^2 \beta_i^2 + \alpha_i^2 \beta_i^3 + 3\beta_i^2 + \beta_i^3);$$

$$S_i = (2\alpha_i \beta_i + 4\alpha_i \beta_i^2 + 2\alpha_i \beta_i^3 + 3\alpha_i^2 + 7\alpha_i^2 \beta_i + 5\alpha_i^2 \beta_i^2 + \alpha_i^2 \beta_i^3 + 2\alpha_i^3 + 4\alpha_i^3 \beta_i + 2\alpha_i^3 \beta_i^2 + \beta_i^2 + \beta_i^3);$$

$$P_i = -(6\alpha_i \beta_i + 9\alpha_i \beta_i^2 + 4\alpha_i \beta_i^3 + 3\alpha_i^2 + 8\alpha_i^2 \beta_i + 7\alpha_i^2 \beta_i^2 + 2\alpha_i^2 \beta_i^3 + \alpha_i^3 + 2\alpha_i^3 \beta_i + \alpha_i^3 \beta_i^2 + 3\beta_i^2 + 2\beta_i^3);$$

$$Q_i = \alpha_i^2 (1 + \alpha_i) (1 + \beta_i)^2.$$

Після підстановки одержаних виразів  $\Delta r_i$ ,  $\Delta x_i$  у (5) підсумовування членів, лінійних за  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ , приводить їх внесок рівним до нуля, оскільки

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = \sum_{i=1}^n \frac{C_i - C_0}{C_0} = \frac{1}{C_0} \left[ \sum_{i=1}^n C_i - nC_0 \right] \equiv 0;$$

$$\sum_{i=1}^n \beta_i = \sum_{i=1}^n \frac{R_i - R_0}{R_0} = \frac{1}{R_0} \left[ \sum_{i=1}^n R_i - nR_0 \right] \equiv 0.$$

Тоді з (5), (6) маємо

$$R_{ВП} = nr_0 (1 + f); \quad X_{ВП} = nx_0 (1 + \delta), \quad (7, 8)$$

де  $f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i$ ;  $\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_i$ .

Дослідження залежності  $f$  від частоти напруги (значення безрозмірного параметра  $\gamma$ ) показує, що

при  $\gamma=0$  значення  $D_i \equiv 0$ , відповідно,  $f_0 \equiv 0$  у той час як у межі  $\gamma > > 1$

$$f=f' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\left[ (1+\beta_i) (1+\alpha_i) \right]^2}$$

У межі  $\gamma=0$

$$\delta_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2\alpha_i\beta_i + \alpha_i\beta_i^2 + \beta_i^2),$$

і, відповідно, при  $\gamma > > 1$

$$\delta = \delta' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i^2}{(1+\alpha_i)}$$

При строго ідентичних елементах високовольтного плеча подільника  $\alpha_i \equiv 0$ ,  $\beta_i \equiv 0$  і значення  $f$  та  $\delta$  при будь-яких  $\gamma$  дорівнюють нулю.

Таким чином, інтегральні параметри високовольтного плеча подільника смісно-омічного пилу за наявності неідентичності його елементів характеризуються, крім відомої залежності  $r_0, x_0$  від  $\omega$ , додатковою залежністю від частоти робочої напруги.

Даний висновок є новим для високовольтних подільників напруги. На підставі виразів (7) та (8), отриманих у загальному випадку неідентичності елементів (без припущення її малості), можуть бути досліджені частотні характеристики коефіцієнта поділення

$$K = \frac{R_{ВП} + r_n - j(X_{ВП} + x_n)}{r_n - jx_n} \quad (9)$$

а також похибки смісно-омічного подільника напруги.

З наведеного вище виразу для коефіцієнта поділення  $K$  можуть бути отримані формули для амплітудно-частотної (АЧХ)  $A(\omega)$  та фазочастотної (ФЧХ)  $\varphi(\omega)$  характеристик подільника ( $\varphi$  відповідає різниці фазових кутів вихідної і вхідної напруг подільника)

$$A(\omega) = \left[ \frac{r_n^2 + x_n^2}{\left( \frac{R_{ВП} + r_n}{2} + \left( \frac{X_{ВП} + x_n}{2} \right)^2 \right)} \right]^{0.5} \quad (10)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{r_n X_{ВП} - x_n R_{ВП}}{r_n (R_{ВП} + r_n) + x_n (X_{ВП} + x_n)} \quad (11)$$

при цьому вирази  $A(\omega)$ ,  $\varphi(\omega)$  обумовлені відповідними залежностями  $R_{ВП}, X_{ВП}, r_n, x_n$  від  $\gamma$ .

З урахуванням залежності  $r_0, x_0$  від  $\gamma$  подамо  $R_{ВП}, X_{ВП}$  як

$$R_{ВП} = nR_0 \frac{(1+f)}{1+\gamma^2}; \quad X_{ВП} = nR_0 \frac{\gamma(1+\delta)}{1+\gamma^2} \quad (12)$$

Параметри низьковольтного плеча подільника звичайно вибирають рівними

$$r = \left( \sum_{i=1}^n R_i \right) / (k-1); \quad c = (k-1) \left( \sum_{i=1}^n C_i \right) / n^2,$$

(де  $k$  — номінальний коефіцієнт подільника), або використовуючи раніше введені позначення

$$r = nR_0 / (k-1); \quad c = C_0 (k-1) / n.$$

Перетворюючи параметри низьковольтного плеча подільника зі схеми паралельного з'єднання елементів (рис. 1) у схему їх послідовного з'єднання (рис. 2), одержимо

$$r_n = nr_0 / (k-1); \quad x_n = nx_0 / (k-1).$$

Підставляючи у (10), (11) ці значення  $r_n, x_n$ , а також  $R_{ВП}, X_{ВП}$  з (12), запишемо вирази для АЧХ і ФЧХ подільника

$$A = k^{-1} \dot{A}, \quad (13)$$

$$\dot{A} = \left[ \frac{1 + \omega^2 R_0^2 C_0^2}{\left( (1 + (k-1)f/k)^2 + \omega^2 R_0^2 C_0^2 (1 + (k-1)\delta/k)^2 \right)} \right]^{0.5};$$

$$\varphi = \arctg \left[ \frac{(\delta - f)\omega R_0 C_0}{\left( (f + k/(k-1)) + \omega^2 R_0^2 C_0^2 (\delta + k/(k-1)) \right)} \right] \quad (14)$$

Дані вирази з урахуванням  $f, \delta$  визначають залежність "нормованої" амплітудно-частотної характеристики  $\dot{A}(\omega)$  [8] та фазово-частотної характеристики  $\varphi(\omega)$  в загальному випадку неідентичності елементів високовольтного плеча.

Необхідно зазначити, що існуючою відповідно до (13), (14) слабкою залежністю АЧХ ( $\dot{A}$ ) і ФЧХ ( $\varphi$ ) від коефіцієнта поділення  $k$  у характерній для високовольтних подільників області його значень ( $k = 1000 \dots 10000$ ) у розрахунках можна нехтувати.

У досліджуваних конструкціях високовольтних подільників при задовільному стані високовольтної ізоляції неідентичність резистивних елементів (обумовлена допуском на відхилення опорного резистора від його номінального значення) можна не враховувати, тобто вважати, що  $R_1 = R_2 = \dots = R_i = \dots = R_0$ , у той час як неідентичність елементів смісності може досягати одиниць-десяти відсотків і більше. Тоді вирази для  $f, \delta$  при  $\beta_i \equiv 0$  набудуть такого вигляду:

$$f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\gamma^2 \alpha_i^2 [\gamma^2 (3+2\alpha_i) - 1]}{(1+\gamma^2) [1+\gamma^2 (1+\alpha_i)^2]}, \quad (15)$$

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\gamma^2 \alpha_i^2 [\gamma^2 (1+\alpha_i) - (3+\alpha_i)]}{(1+\gamma^2) [1+\gamma^2 (1+\alpha_i)^2]}. \quad (16)$$

Вважаючи розподілення параметрів  $\alpha_i$  ємностей високовольтного плеча нормальним, перейдемо до визначення усереднених значень  $f, \delta$  (15,16) за допомогою інтегральних виразів для нормального розподілення

$$f = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\theta\sigma}^{\theta\sigma} \frac{\gamma^2 \alpha^2 [\gamma^2 (3+2\alpha) - 1]}{1+\gamma^2} e^{(-\alpha^2/2\sigma^2)} d\alpha; \quad (17)$$

$$\delta = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\theta\sigma}^{\theta\sigma} \frac{\gamma^2 \alpha^2 [\gamma^2 (1+\alpha) - (3+\alpha)]}{1+\gamma^2} e^{(-\alpha^2/2\sigma^2)} d\alpha, \quad (18)$$

де  $\sigma$  — значення середнього квадратичного відхилення (СКО) розподілення;  $\theta$  — параметр, що визначає межі області інтегрування за  $\alpha$ .

Розрахунки залежностей  $A', \varphi$  від  $\gamma$  були виконані на ПЕОМ при  $\theta=5$ . Область інтегрування за  $\alpha$  від  $-5\sigma$  до  $+5\sigma$  розбивалася на 10 інтервалів, а інтегральні суми на кожному інтервалі визначалися методом Гауса при інтерполяції функції поліномом 5-го степеня.

На рис. 3 показано отримані розрахункові частотні залежності  $A' = (A-1)100\%$ , а також  $\varphi$  (в кутових градусах) від  $\gamma$  для значень  $\sigma=0,05; 0,1$  (відповідно, 5 і 10%) та  $k=10^4$ . При  $\gamma=0$  згідно з (13), (17)  $A'=1$ . При  $\gamma \gg 1$ , як випливає з (13),  $A' = [1 + \delta' (k-1)/k]^{-1}$ , що підтверджується графіками рис. 3 в області  $\gamma > 10$ . Величина  $\delta'$  дорівнює усередненому за розподіленням (18) значенню  $\alpha_i^2 / (1+\alpha_i)$ . Тоді перетворюючи (18) при підстановці  $t = \alpha/\sigma$ , можна показати, що значення  $\delta'$  в основному є пропорційним  $\sigma^2$ . Такий висновок підтверджується ходом кривих  $A'$  на рис. 3. Характерний перехід кривих  $A'$  через нуль для різних  $\sigma$  відбувається в області  $\gamma \approx 1$ . Найбільша зміна  $A'$  відбувається в області від  $\gamma \approx 0,5$  до  $\gamma \approx 10$ , при цьому максимальна зміна амплітудно-частотної характеристики  $|\Delta A'|_{\max} (\%)$  перевищує значення  $\delta' \cdot 100\%$ .

За результатами проведених розрахунків були побудовані сімейства розрахункових залежностей змін  $A$  для значень  $\sigma$  від 0,1% до 17,5%. На рис. 4 показано отриману залежність максимальної зміни  $|\Delta A'|_{\max} (\%)$  від  $\sigma$ . Максимальна зміна амплі-

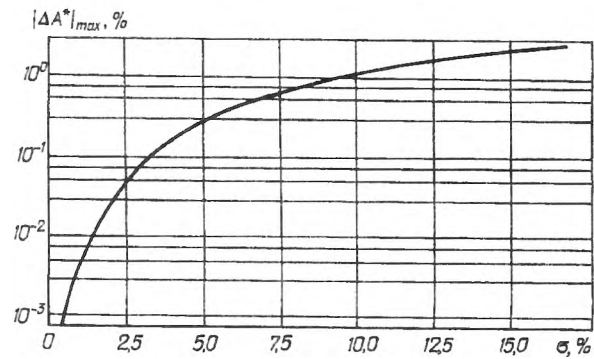
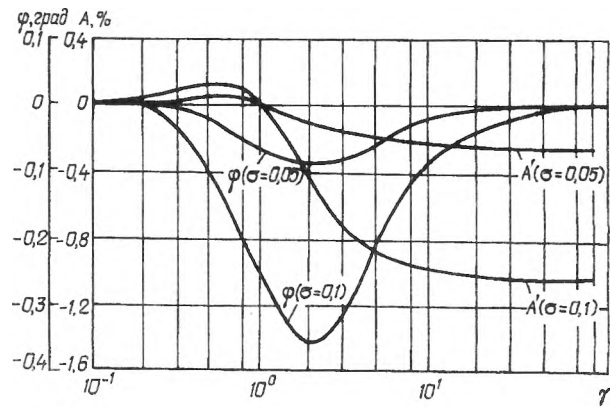


Рис. 3, 4

літудно-частотної характеристики монотонно зростає із збільшенням  $\sigma$ , перевищуючи, наприклад, значення 0,1% при  $\sigma \geq 3\%$ . Тобто, для досягнення стабільності АЧХ подільника в діапазоні до 0,1% необхідно забезпечити СКО розподілу ємностей елементів його високовольтного плеча не більше 3%. При значенні СКО  $\sigma=5\%$  (10%) максимальна зміна АЧХ подільника становитиме відповідно 0,3% (1,2%).

Розрахункові криві  $\varphi(\gamma)$  (рис. 3) відповідно до (14) асимптотично наближаються до нуля при значеннях  $\gamma \rightarrow 0$  та  $\gamma \gg 1$ . Максимальні значення  $\varphi(\gamma)$  відповідають області  $\gamma \approx 2$  та (аналогічно значенням  $|\Delta A'|_{\max}$ ), є пропорційними  $\sigma^2$ . На рис. 5 показано розрахункову залежність максимального (за розміром) значення  $\varphi_{\max}$  від  $\sigma$ . За даними цієї кривої, наприклад, для наведеного вище значення  $\sigma=3\%$  максимальна фазова похибка подільника становитиме  $-2'$ , а для  $\sigma=5\%$  (10%) — відповідно

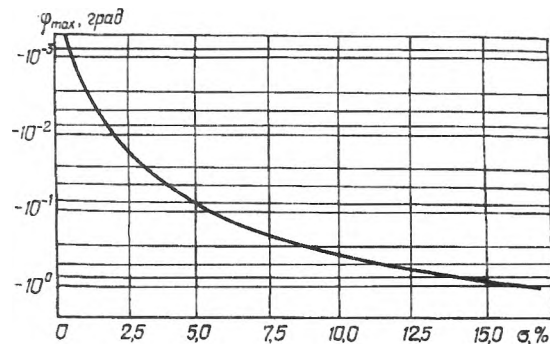


Рис. 5

–5,5' (–22').

Залежно від допустимого рівня похибок на підставі кривих рис. 4, рис. 5 можуть бути визначені допустимі значення неідентичності елементів високовольтного плеча подільника.

При співставленні максимальних змін АЧХ і ФЧХ, виражених у відносних одиницях, виявляється, що вплив неідентичності елементів сміності високовольтного плеча в 1,7...1,8 рази є більш значним для амплітудних характеристик подільника, ніж для фазових.

Розглянуті нестабільності характеристик подільника, викликані складом його структурних елементів, дозволяють пояснити відомі практичні дані [4] про збільшений рівень похибок, а саме, високовольтних широкосмугових подільників напруги, що містять, як правило, значну кількість високовольтних конденсаторів з допуском за сміністю  $\pm 15... 20\%$  і більше.

Можливість значної додаткової похибки (до 1...2% і більше) в області перехідних частот від нуля до десятків та сотень кілогерц повинна враховуватись як при розробці та дослідженні нових конструкцій високовольтних подільників напруги, так і при проведенні вимірювань (в тому числі, якості електроенергії) в високовольтних електричних мережах.

1. Болотин И.Б., Эйдель Л.З. Измерения при испытании аппаратов в режимах короткого замыкания. — Л.: Энергоатомиздат. — 1988. — 200 с.

2. Бржезицкий В.О., Стогий Б.С. Методичні вказівки до вивчення дисципліни "Вимірювання високих напруг та великих струмів" для студентів спеціальності 7.090604 "Техніка та електрофізика високих напруг". — К.: КПІ. 1994. — 32 с.

3. Бржезицкий В.А., Иерусалимов М.Е., Проценко А.Р. О частотной зависимости характеристик емкости-омического делителя напряжения // Техн.электродинамика. — 1987. — № 1. — С. 3—7.

4. Гуров С.А., Владимиров Г.А., Злобин О.А. Состояние исследований и разработки средств измерения сверхвысоких напряжений 1—4 МВ. — М.: Информэлектро. 1975. — 80 с.

5. Иерусалимов М.Е., Бржезицкий В.А., Проценко А.Р. и др. Выравнивание распределения напряженности электрического поля в рабочем объеме изоляционной конструкции с помощью электродов // Изв. ВУЗов. Энергетика. — 1988. — № 7. — С. 3—7.

6. Нейман Л.Р., Демичьян К.С. Теоретические основы электротехники: в 2-х томах. — Л.: Энергоатомиздат. 1981. — 536 с.

7. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения. — Л.: Энергоатомиздат. 1983. — 264 с.

8. ГОСТ 13109-97 "Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения".

Надійшла 12.01.2007

УДК 621.548:621.311.245

П.П.Пекур (Ін-т відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

## Режимні обмеження на параметри роботи вітроелектричних установок під навантаженням

*Визначено область зміни відносного аеродинамічного моменту ротора вітроелектричних установок (ВЕУ) з асинхронними та синхронними генераторами, яка відповідає генераторному режиму роботи і в межах якої не виникає перенавантажень електричних машин, обумовлених пульсаціями швидкості вітру. Отримано аналітичні вирази для меж робочої області на аеродинамічних характеристиках. Встановлено діапазони робочих швидкостей вітру та проаналізовано вплив параметрів ВЕУ на величину цих діапазонів.*

*Определена область изменения относительного аэродинамического момента ротора ветроэлектрических установок (ВЭУ) с асинхронными и синхронными генераторами, которая соответствует генераторному режиму работы и в пределах которой не возникает перегрузок электрических машин, обусловленных пульсациями скорости ветра. Получены аналитические выражения для границ рабочей области на аэродинамических характеристиках. Установлены диапазоны рабочих скоростей ветра и проанализировано влияние параметров ВЭУ на величину этих диапазонов.*

Вітроелектрична установка (ВЕУ) є джерелом електричної енергії, поточна потужність якої ви-

значається величиною та змінами швидкості вітру у часі. Непередбачуваність вітру поєднується з ве-

© Пекур П.П., 2007