

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.

Важким для ВЕУ є режим, коли швидкість вітру наближається до нижньої допустимої межі ( $\approx 5$  м/с). При цьому відбуваються часті вмикання і вимикання АГ, що призводить до зростання втрат, прискорення зношування АГ і комутаційної апаратури, а також до просідання напруги в мережі 380 В. Тобто виникає необхідність розв'язання таких задач:

1. Вибору частоти обертання ротора АГ в момент підмикання, при якій забезпечуються мінімальні втрати енергії і мінімальний час перехідного процесу.
2. Обмеження викиду струму в статорі АГ в момент підмикання, тобто забезпечення “м'якого” його пуску.

Авторами запропоновано такий шлях розв'язання цих задач. Для обмеження викидів струму в обмотках статора АГ, в момент його підмикання, в схему передбачено ввести додаткові дроселі ДР. Дроселі ДР шунтуються після завершення збудження АГ за допомогою електронних ключів К. Вибір значення індуктивності ДР, часу їх вмикання, а також частоти обертання ротора АГ у момент підмикання здійснити за допомогою цифрового моделювання.

Математична модель ВЕУ (рис.1) розроблена на основі паспортних даних АГ і мережі, використовуючи теорію моделювання електромеханічних систем [2]. Ця теорія дає змогу врахувати насиченість магнітопроводів електричних машин і апаратів, несиметрію фазних напруг і забезпечує високий ступінь адекватності моделі реальним установкам. Структурна схема моделі показана на рис.1 і представлена як з'єднання багатополісників: дванадцятиполісника (асинхронний генератор АГ), шестиполісника (МЕРЕЖА) і трьох двополісників (дроселі ДР).

Загальний алгоритм побудови математичної моделі електромеханічної системи описаний в [2].

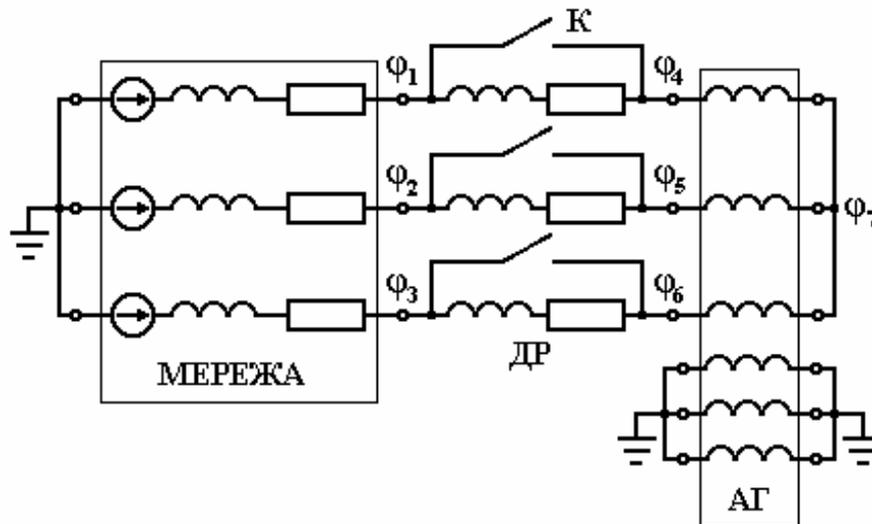


Рис.1. Структурна схема моделі.

Кожний електричний багатополісник описується вузловим зовнішнім рівнянням

$$\vec{p} \vec{i}_e + \vec{G}_e \vec{\varphi}_e + \vec{C}_e = 0, \quad (1)$$

де  $\vec{i}_e$  – вектор струмів зовнішніх віток елемента;  $\vec{\varphi}_e$  – вектор потенціалів зовнішніх вузлів елемента;  $\overset{\vee}{G}_e$  – матриця коефіцієнтів перед потенціалами;  $\vec{C}_e$  – вектор вільних членів;  $p = d/dt$  – оператор диференціювання за часом.

Електричні багатополосники з'єднуються між собою у вузлах системи. Зв'язок між потенціалами зовнішніх вузлів елемента-багатополосника і потенціалами незалежних вузлів системи встановлюється рівнянням

$$\vec{\varphi}_j = \overset{\vee}{\Pi}_{\varphi j} \vec{\varphi}_c, \quad j = (\text{МЕРЕЖА, ДР, АГ}); \quad (2)$$

де  $\vec{\varphi}_c = (\varphi_1, \dots, \varphi_7)_t$  – вектор потенціалів незалежних вузлів системи;  $\overset{\vee}{\Pi}_j$  – матриця під'єднання, яка описує математичну схему під'єднання зовнішніх віток j-го структурного елемента до незалежних вузлів системи.

Згідно з першим законом Кірхгофа запишемо

$$\sum_{j=\text{МЕРЕЖА, ДР, АГ}} \overset{\vee}{\Pi}_j \cdot \vec{i}_j = 0, \quad (3)$$

або

$$\sum_{j=\text{МЕРЕЖА, ДР, АГ}} \overset{\vee}{\Pi}_j \cdot \vec{p}i_j = 0. \quad (4)$$

Підставивши рівняння (2) в (1) визначимо вектор  $\vec{p}i_j$ , після підстановки якого в рівняння (4) отримаємо рівняння для визначення вектора  $\vec{\varphi}_c$

$$\sum_{j=\text{МЕРЕЖА, ДР, АГ}} \overset{\vee}{\Pi}_j \cdot \overset{\vee}{G}_j \cdot \overset{\vee}{\Pi}_{\varphi j} \cdot \vec{\varphi}_c + \sum_{j=\text{МЕРЕЖА, ДР, АГ}} \overset{\vee}{\Pi}_j \cdot \vec{C}_j = 0, \quad (5)$$

або

$$\overset{\vee}{G}_c \cdot \vec{\varphi}_c = \vec{C}_c; \quad (6)$$

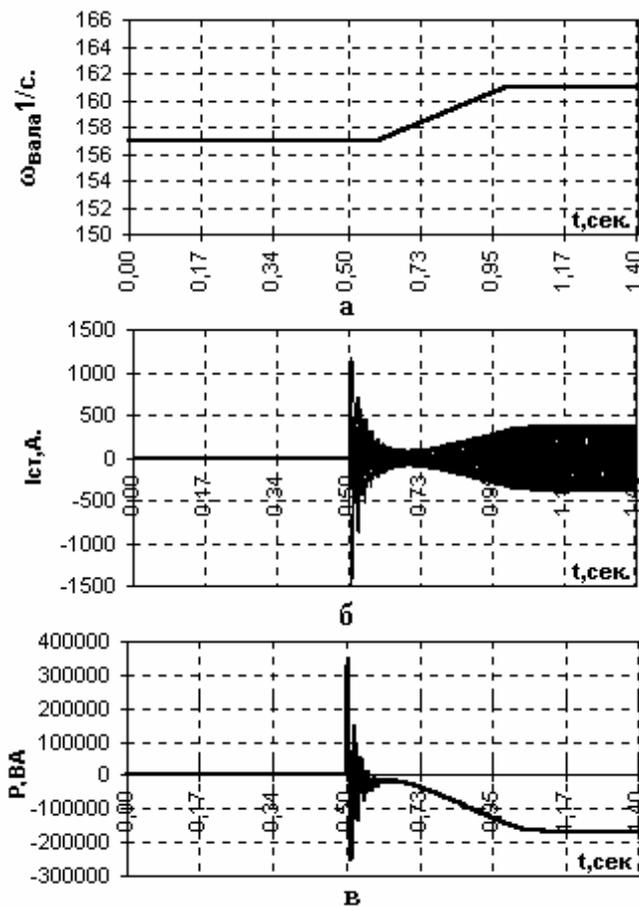
де

$$\vec{G}_c = \sum_{j=\text{МЕРЕЖА, ДР, АГ}} \overset{\vee}{\Pi}_j \cdot \overset{\vee}{G}_j \cdot \overset{\vee}{\Pi}_{\varphi j}; \quad \vec{C}_c = \sum_{j=\text{МЕРЕЖА, ДР, АГ}} \overset{\vee}{\Pi}_j \cdot \vec{C}_j \quad (7)$$

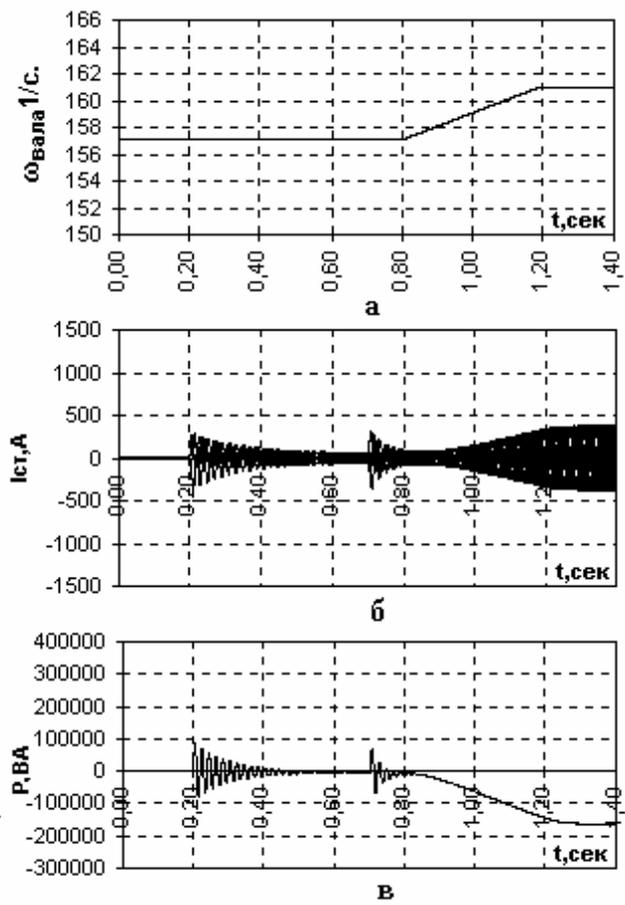
Розв'язком диференціальних рівнянь вигляду (1) для кожного структурного елемента є числове значення вектора  $\vec{u} = (\vec{i}_{\text{МЕРЕЖА}}, \vec{i}_{\text{ДР}}, \vec{i}_{\text{АГ}})$  на кожному кроці інтегрування.

Розроблена математична модель дозволила провести дослідження системи “асинхронний генератор – мережа” в різних режимах роботи.

У результаті дослідження виявлено, що раціональний режим підмикання АГ до мережі забезпечується при частоті обертання АГ, яка дорівнює синхронній ( $\omega_{\text{СИНХР}} = 157,08$  1/с). На рис.2,а,б,в показані часові діаграми швидкості АГ ( $\omega$ ), струму в статорі ( $I_{\text{СТ}}$ ) і миттєвого значення потужності ( $S$ ) в режимі підмикання АГ до мережі при синхронній швидкості вала АГ ( $\omega_{\text{СИНХР}}$ ), з подальшим наростанням швидкості обертання АГ (ДР – відсутні).



**Рис.2.** Підмикання АГ до мережі при початковій швидкості  $\omega_{\text{СИНХР}}=157,08$  рад./с:  
 а – діаграма зміни швидкості ( $\omega_{\text{ВАЛА}}$ );  
 б – діаграма зміни струму статора АГ ( $I_{\text{СТ}}$ );  
 в – діаграма миттєвого значення потужності АГ ( $P$ ).



**Рис.3.** Підмикання АГ до мережі при наявності ДР (момент вмикання ДР  $t=0,2$  с, а вимикання –  $t=0,7$  с), при початковій швидкості  $\omega_{\text{СИНХР}}=157,08$  рад./с:  
 а – діаграма зміни швидкості ( $\omega_{\text{ВАЛА}}$ );  
 б – діаграма зміни струму статора АГ ( $I_{\text{СТ}}$ );  
 в – діаграма миттєвого значення потужності АГ ( $P$ ).

На рис.3,а,б,в зображені часові діаграми підмикання АГ до мережі при синхронній швидкості вала АГ ( $\omega_{\text{СИНХР}}$ ) аналогічно, як на рис.2 при введенні ДР. Вибір значення індуктивності ДР, а також часу їх підмикання проведено з умови обмеження викиду пускового струму, а також викиду струму в момент шунтування ДР ключами К на рівні номінального.

### Висновки

1. При підмиканні АГ до мережі виникає викид струму в обмотці статора, амплітуда якого значно перевищує номінальне значення (в 5-6 разів) і не залежить від швидкості привідного вала  $\omega_{\text{ВАЛА}}$ .

2. Більш раціональним для підмикання АГ до мережі є режим, коли швидкість його вала дорівнює або є дещо вищою від синхронної, тому що АГ не переходить у режим двигуна і не споживає енергії з мережі. Крім цього зменшується час перехідного процесу.

3. Встановлено, що для обмеження викиду пускового струму в колі статора АГ на рівні номінального необхідно ввімкнути ДР з індуктивністю  $L_{др} = 4$  мГн.

4. При шунтуванні дроселів ДР спостерігається викид струму, причому амплітуда його зростає, якщо шунтування відбувається при швидкості, яка відрізняється від синхронної.

5. Результати моделювання збігаються з дослідженнями, проведеними безпосередньо на ВЕУ і тому розроблену модель можна використовувати для дослідження різних режимів роботи ВЕУ такого типу.

1. Шидловский А.К., Лиценко А.И., Резцов В.Ф. и др. Проблемы преобразования энергии ветроэнергетических установок // Техническая электродинамика. 1993. № 3. С.41–45.
2. Плахтина Е. Г. Математическое моделирование электромашино – вентиляных систем. Львов, 1986.

УДК 621.3.019.3(075)

Лазько О.В.

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра ТРР

## КОМПОЗИЦІЇ ПОЧАТКОВИХ РОЗПОДІЛІВ ПАРАМЕТРІВ РЕП І РОЗПОДІЛІВ ЇХ ВІДХИЛЕНЬ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ

© Лазько О.В., 2000

**У статті наведено композиції початкових розподілів параметрів РЕП та їх відхилень під час експлуатації. Розглянуто композиції нормального, обмеженого нормального, рівномірного та аномального законів.**

Кожен технічний об'єкт характеризується множиною визначальних параметрів, що є мірилом його якості. Процеси зміни визначальних параметрів в загальному випадку є випадковими і нестационарними [1, 3]. Це пов'язано з різноманітними явищами в матеріалах під впливом комплексу дестабілізуючих чинників. Випадковий процес зміни параметрів РЕП прийнято розглядати як адитивні функції [3].

$$x(t) = \eta(t) + \zeta(t) + \varepsilon(t),$$

де  $x(t)$  – випадкова функція зміни параметра під час експлуатації;  $\eta(t)$  – напіввипадковий процес незворотних змін параметра;  $\zeta(t)$  і  $\varepsilon(t)$  – стаціонарні або нестационарні випадкові процеси.

Напіввипадковий процес незворотних змін параметра  $\eta(t)$  розглядається у вигляді

$$\eta(t) = x_0 + \int_0^t B(\tau) d\tau,$$

де  $x_0$  – початкове значення параметра, з яким виріб виходить із заводу-виробника;  $B(\tau)$  – напіввипадковий процес зміни швидкості повільного дрейфу параметра.