

**Особенности проектирования  
асинхронных электрогенераторов системных  
ветроэнергетических установок**

Олешкевич М.М., Макоско Ю.В.

Белорусский национальный технический университет

Асинхронные машины с короткозамкнутым ротором находят все более широкое применение в качестве электрогенераторов ветроэнергетических установок. Особенности работы электрогенератора в такой установке связаны с характеристиками ветрового потока – порывистостью ветра.

Для изучения происходящих электромагнитных процессов была разработана математическая модель системной ветроэнергетической установки (ВЭУ) с асинхронным электрогенератором [1]. Математическая модель описывает ветродвигатель, асинхронный генератор, батарею конденсаторов, линию-связи с энергосистемой и представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка. Для выявления степени влияния параметров генератора и коэффициентов порывистости скорости ветра на энергетические показатели квазиустановившегося режима работы ветроагрегата было выполнено планирование регрессионных экспериментов, с использованием полного и дробного факторных экспериментов. Вычислительные эксперименты проводились на ПЭВМ в математической системе MATLAB. В качестве факторов, влияющих на квазиустановившийся режим работы, были выбраны параметры схемы замещения асинхронного генератора и средняя скорость ветра. Искомыми функциями откликов являлись действующие значения токов статора и ротора генератора как основной, так и высших гармоник и субгармоник, а также величины средних и пульсационных скольжений. Регрессионные модели были представлены в виде линейных полиномов.

Для первого планирования эксперимента в качестве функций откликов были выбраны действующие значения гармоник тока статора с частотами 49 и 51 Гц:  $I_{1(49)}$ ,  $I_{1(51)}$ . Планирование эксперимента проводилось на примере асинхронного генератора 110 кВт. Параметры генератора, трансформаторов и линий приведены в [1].

Параметры генератора, влияние которых на квазиустановившийся режим работы подлежит исследованию – это активные сопротивления обмоток статора и ротора  $R_1$  и  $R'_2$ , переходные реактивности статора и ротора  $X'_s$ ,  $X'_r$  и средняя скорость ветра  $V_{cp}$ . Для построения матрицы планирования воспользуемся дробным факторным экспериментом (ДФЭ) для пяти факторов, содержащим 16 опытов. Варьируемые факторы:  $Z_1 = R_1$ ,  $Z_2 = R'_2$ ,  $Z_3 = X'_s$ ,  $Z_4 = X'_r$ ,  $Z_5 = V_{cp}$ , где  $Z_5 = Z_1 Z_2 Z_3 Z_4$ .

Качественное исследование влияния варьируемых факторов на квазиустановившийся режим работы ВЭУ. Полиномы для гармоник частоты 51 и 49 Гц могут быть представлены в виде

$$I_{1(51)} = 29,33 - 3,028 R_1 - 14,2025 R'_2 + 10,36 X'_s + 11,33 X'_r + 12,58 V_{cp} + 3,4 R_1 R'_2 - 1,92 R_1 X'_s - 3,93 R_1 X'_r - 5,86 R_1 V_{cp} - 8,41 R'_2 X'_s - 4,42 R'_2 X'_r - 5,32 R'_2 V_{cp} + 6,99 X'_s X'_r + 5,27 X'_s V_{cp} + 4,26 X'_r V_{cp}; \quad (3)$$

$$I_{1(49)} = 27,033 - 0,52 R_1 - 11,396 R'_2 + 6,648 X'_s + 9,086 X'_r + 8,71 V_{cp} + 0,515 R_1 X'_s - 3,4862 R_1 V_{cp} - 5,00125 R'_2 X'_s - 2,9912 R'_2 X'_r - 2,54 R'_2 V_{cp} + 4,24125 X'_s X'_r + 2,0625 X'_s V_{cp} + 2,0625 X'_r V_{cp}. \quad (4)$$

Как установлено, для снижения механических вибраций и колебаний системы ветродвигатель – опорные подшипники ветроротора – генератор, а также для снижения потерь от высших гармоник и субгармоник в энергосистеме, необходимо снижение токов  $I_{1(51)}$  и  $I_{1(49)}$ . Анализ полиномов (5), (6) показывает, что с точки зрения технологии наиболее рационально для этого увеличение сопротивления  $R'_2$ . Таким образом, при получении регрессионных моделей квазиустановившихся режимов работы ВЭУ можно ограничиться варьированием двух факторов: активного сопротивления короткозамкнутой обмотки ротора  $R'_2$  и средней скорости ветра  $V_{cp}$ , таким образом достаточно матрицы плана для числа факторов  $N = 2$ , для чего необходим полный факторный эксперимент  $2^2$ , который проводится аналогично.

Оптимальная величина активного сопротивления обмотки короткозамкнутого ротора асинхронного генератора определяется с использованием целевой функции и поиска ее экстремумов:

$$P_{\text{э50}} = \frac{3R'_2(I'_{2(50)})^2}{2S} - 0,005P_{\text{гн}} \left( \frac{I_{1(50)}}{I_{1н}} \right)^2 - \Delta P_{\text{д50}} - 3I_{1(50)}^2 R_1. \quad (5)$$

Величины  $I_{1(50)}$ ,  $I'_{2(50)}$ ,  $S$  – являются некоторыми функциями  $R'_2$  и  $V_{\text{ср}}$ :

$$I_{1(50)} = f_1(R'_2, V_{\text{ср}}); \quad (6)$$

$$I'_{2(50)} = f_2(R'_2, V_{\text{ср}}); \quad (7)$$

$$S = f_3(R'_2, V_{\text{ср}}). \quad (8)$$

Функции (6)–(8) получены по разработанной методике, с проведением полного факторного эксперимента  $2^2$ . Максимум функции (5) определяется на основании соотношений

$$\frac{\partial P_{\text{э50}}}{\partial R'_2} = 0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial P_{\text{э50}}}{\partial V_{\text{ср}}} = 0; \quad (10)$$

Для поиска максимума функции с использованием математической системы MatLab, выражения (9),(10) дополняются условием допустимого нагрева генератора:

$$\Delta P_{\text{гн}} \leq \Delta P_{\text{доп}}, \quad (11)$$

где  $\Delta P_{\text{доп}}$  – максимально допустимые паспортные потери рассматриваемого базового генератора, и условием допустимой несинусоидальности формы кривой напряжения:

$$\frac{100\%}{U_1} \sqrt{\sum_v^n U_v^2} \leq K_{\text{доп}}, \quad (12)$$

где  $K_{\text{доп}} = 5\%$  – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;  $U_1$  – действующее значение напряжения основной частоты.

### Литература

1. Олешкевич М.М., Макошко Ю.В. Моделирование квазиустановившихся режимов работы асинхронного генератора системного ветроагрегата // Энергетика...(Изв. Высш. учебн. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2003. – № 3.