

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ СИСТЕМНЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Инж. МАКОСКО Ю. В.

*Белорусский национальный технический университет*

Асинхронные машины с короткозамкнутым ротором находят все более широкое применение в качестве электрогенераторов ветроэнергетических установок, прежде всего установок, работающих в энергосистеме параллельно с другими генераторами, вследствие высокой надежности, простоты конструкции и экономичности. Особенности работы электрогенератора в такой установке связаны с характеристиками ветрового потока – порывистостью ветра. Ветровой поток всегда пульсирует, изменяясь относительно среднего значения скорости ветра, в широком диапазоне. В широком диапазоне пульсируют отдаваемая генератором мощность, токи, скольжение ротора. Таким образом, генератор ветроэнергетической установки постоянно работает в переходных режимах низкой частоты, обусловленных низкочастотной пульсацией потока, т. е. в квазиустановившихся режимах.

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. Вычисления проводились на ЭВМ 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.

Мгновенное значение скорости ветра в турбулентном потоке [1] при синусоидальном законе изменения скорости ветра

$$v(t) = v_{\text{cp}} + \Delta v_{\text{пор}} \sin(2\pi f_{\text{пор}} t), \quad (1)$$

где  $v_{\text{cp}}$  – среднее значение скорости ветра на высоте оси ветроколеса, м/с;  $\Delta v_{\text{пор}}$  – амплитуда порыва скорости ветра, м/с;  $f_{\text{пор}}$  – частота порыва скорости ветра, Гц, – условная расчетная величина, определяемая из уравнения равенства дисперсии высоко- и низкочастотных колебаний спектра

$$\int_{f_{\min}}^{f_v} S(f)df = \int_{f_v}^{f_{\max}} S(f)df, \quad (2)$$

где энергетический спектр пульсаций скорости ветра  $S(f)$  описывается уравнением Колмогорова [1].

Максимальная пульсация скорости ветра обусловлена низкочастотными составляющими спектра, которые играют основную роль в появлении крупномасштабных амплитуд и порывов ветра [2]. Расчетная частота порыва скорости ветра  $f_{\text{пор}}$  с учетом всего инерционного интервала до его низкочастотной границы с периодами 50...80 с при максимальном пределе интегрирования  $f_{\text{max}} = 10...20$  Гц, что соответствует интервалу спектра с мелкомасштабными пульсациями скорости ветра, на основании (2) составляет  $f_{\text{пор}} = 1$  Гц.

Регрессионные модели двух реальных ветровых площадок, расположенных в Минской области, представлены уравнениями:

$$\Delta v_{\text{пор}} = -0,0613v_{\text{cp}} + 1,1653, \text{ м/с}; \quad (3)$$

$$\Delta v_{\text{пор}} = -0,1087v_{\text{cp}} + 1,4596, \text{ м/с}. \quad (4)$$

Уравнения показывают изменение амплитуды порывов скорости ветра в зависимости от его средней скорости и физико-географического расположения ветровой площадки.

Как установлено [1], критерием снижения механических вибраций и колебаний системы ветродвигатель – редуктор – ротор электрогенератора может служить величина пульсации токов статора  $\delta I_m$  асинхронного генератора. Функция тока статора, полученная в [1] и переведенная в частотную область, показана на рис. 1.

Очевидно, что величина пульсации тока статора тем выше, чем выше значения высших и субгармоник в кривой тока статора генератора, а генерация высших и субгармоник в энергосистему является негативным фактором, приводящим к появлению дополнительных потерь мощности и энергии в энергосистеме.

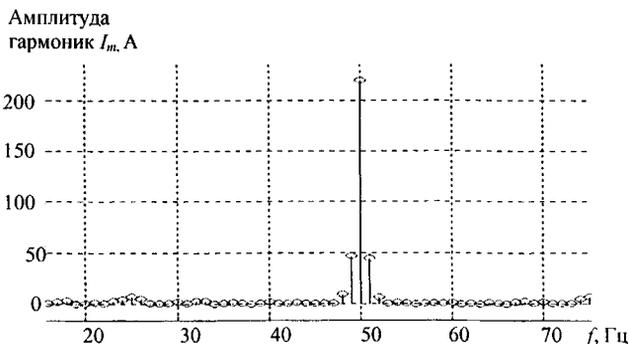


Рис. 1. Фазный ток статора асинхронного генератора ВЭУ-110 кВт:  $v_{\text{cp}} = 12$  м/с; активное сопротивление обмотки ротора имеет базовое значение

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:

- трансформатор 35/10 кВ;  $S_{нт} = 2500$  кВа;  $U_k = 6,5$  %;  $\Delta P_k = 23,5$  кВт;
- трансформатор 10/0,4 кВ;  $S_{нт} = 400$  кВа;  $U_k = 4,5$  %;  $\Delta P_k = 5,5$  кВт;
- воздушная ЛЭП-10 кВ;  $L_{вл} = 2,5$  км;  $X_0 = 0,4$  Ом/км;
- кабельная ЛЭП-0,4 кВ;  $L_{вл} = 0,4$  км;  $X_0 = 0,4$  Ом/км;  $R_0 = 0,169$  Ом/км;
- асинхронный генератор:  $P_{нт} = 110$  кВт;  $U_{нт} = 220/380$  В;  $2p = 4$ ;  
 $R_1 = 0,0253$  Ом;  $R'_2 = 0,0209$  Ом;  $X_1 = 0,1335$  Ом;  $X'_2 = 0,175$  Ом;  $X_0 = 5,363$  Ом.

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  $v_{cp}$ , определяющая коэффициенты порывистости скорости ветра.

**Построение матрицы планирования.** 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  $Z_5 = Z_1 Z_2 Z_3 Z_4$ .

В табл. 1 приведены основные уровни (параметры базовой асинхронной машины) и интервалы варьирования факторов  $Z_i$ .

Таблица 1

Основные уровни и интервалы варьирования факторов

| Варьируемый фактор                                | Максимальное значение фактора $Z_{max}$ | Минимальное значение фактора $Z_{min}$ | Основной (базовый) уровень фактора $Z_{осн}$ |
|---|---|--|--|
| Активное сопротивление обмотки статора $R_1$ , Ом | 0,03795                                 | 0,01265                                | 0,0253                                       |
| Активное сопротивление обмотки ротора $R'_2$ , Ом | 0,0418                                  | 0,01045                                | 0,0209                                       |
| Переходная реактивность статора $X'_s$ , Ом       | 0,4569                                  | 0,1523                                 | 0,3046                                       |
| Переходная реактивность ротора $X'_r$ , Ом        | 0,46035                                 | 0,15345                                | 0,3069                                       |
| Средняя скорость ветра $v_{cp}$ , м/с             | 12                                      | 5                                      | 8,5  |

Матрица плана дробного факторного эксперимента  $2^{5-1}$  построена в соответствии с [3]. Численные значения, которые принимали варьируемые факторы в вычислительных экспериментах, и полученные значения функций-откликов приведены в табл. 2. Расчет коэффициентов полиномов, проверка их значимости и адекватности модели были выполнены согласно известной методике [3].

Значения варьируемых факторов и функций-откликов

| Номер опыта | Активное сопротивление обмотки |                    | Переходная реактивность |                    | Средняя скорость ветра $v_{cp}$ , м/с | Действующее значение гармоники тока статора частотой |                       |
|-------------|--------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|---------------------------------------|--|-----------------------|
|             | статора $R_1$ , Ом             | ротора $R'_2$ , Ом | статора $X'_s$ , Ом     | ротора $X'_r$ , Ом |                                       | 49 Гц $I_{I(49)}$ , А                                | 51 Гц $I_{I(51)}$ , А |
| 1           | 0,01265                        | 0,01045            | 0,1523                  | 0,15345            | 12                                    | 30,25  | 30,8                  |
| 2           | 0,03795                        | 0,01045            | 0,1523                  | 0,15345            | 5                                     | 14,61  | 12,9                  |
| 3           | 0,01265                        | 0,0418             | 0,1523                  | 0,15345            | 5                                     | 5,45   | 3,43                  |
| 4           | 0,03795                        | 0,0418             | 0,1523                  | 0,15345            | 12                                    | 11,85  | 11,36                 |
| 5           | 0,01265                        | 0,01045            | 0,4569                  | 0,15345            | 5                                     | 20,75  | 19,2                  |
| 6           | 0,03795                        | 0,01045            | 0,4569                  | 0,15345            | 12                                    | 39,8   | 48,2                  |
| 7           | 0,01265                        | 0,0418             | 0,4569                  | 0,15345            | 12                                    | 16,48  | 14,93                 |
| 8           | 0,03795                        | 0,0418             | 0,4569                  | 0,15345            | 5                                     | 4,39   | 3,17                  |
| 9           | 0,01265                        | 0,01045            | 0,1523                  | 0,46035            | 5                                     | 19,66  | 19,2                  |
| 10          | 0,03795                        | 0,01045            | 0,1523                  | 0,46035            | 12                                    | 42,6   | 36,11                 |
| 11          | 0,01265                        | 0,0418             | 0,1523                  | 0,46035            | 12                                    | 26,2   | 26,85                 |
| 12          | 0,03795                        | 0,0418             | 0,1523                  | 0,46035            | 5                                     | 12,46  | 11,06                 |
| 13          | 0,01265                        | 0,01045            | 0,4569                  | 0,46035            | 12                                    | 86,07  | 130,6                 |
| 14          | 0,03795                        | 0,01045            | 0,4569                  | 0,46035            | 5                                     | 53,7   | 51,2                  |
| 15          | 0,01265                        | 0,0418             | 0,4569                  | 0,46035            | 5                                     | 15,57  | 13,8                  |
| 16          | 0,03795                        | 0,0418             | 0,4569                  | 0,46035            | 12                                    | 32,7   | 36,42                 |

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

$$I_{I(51)} = 29,33 - 3,028R_1 - 14,2025R'_2 + 10,36X'_s + 11,33X'_r + 12,58v_{cp} + 3,4R_1R'_2 - 1,92R_1X'_s - 3,93R_1X'_r - 5,86R_1v_{cp} - 8,41R'_2X'_s - 4,42R'_2X'_r - 5,32R'_2v_{cp} + 6,99X'_sX'_r + 5,27X'_s v_{cp} + 4,26X'_r v_{cp}; \quad (5)$$

$$I_{I(49)} = 27,033 - 0,52R_1 - 11,396R'_2 + 6,648X'_s + 9,086X'_r + 8,71v_{cp} + 0,515R_1X'_s - 3,4862R_1v_{cp} - 5,00125R'_2X'_s - 2,9912R'_2X'_r - 2,54R'_2v_{cp} + 4,24125X'_sX'_r + 2,0625X'_s v_{cp} + 2,0625X'_r v_{cp}. \quad (6)$$

Таким образом, на величины действующих значений токов  $I_{I(49)}$  и  $I_{I(51)}$  наибольшее влияние оказывает активное сопротивление короткозамкнутой обмотки ротора  $R'_2$ . Значительное влияние оказывают также переходные реактивности статора и ротора  $X'_s$  и  $X'_r$ , средняя скорость ветра  $v_{cp}$ . Как установлено, для снижения механических вибраций и колебаний системы ветродвигатель – опорные подшипники ветроротора – генератор, а также потерь от высших гармоник и субгармоник в энергосистеме необходимо снижение токов  $I_{I(51)}$  и  $I_{I(49)}$ . Анализ полиномов (5), (6) показывает, что, с точки зрения технологии, наиболее рационально для этого увеличение сопротивления  $R'_2$ . Снижение значений токов посредством уменьшения значений реактивностей  $X'_s$  и  $X'_r$  нерационально, так как для этого требуется

увеличение размеров воздушного зазора, что удорожает машину и приводит к росту намагничивающего тока и повышению потребления реактивной мощности. Снижение значений реактивностей  $X'_s$  и  $X'_r$  посредством увеличения открытости и размеров паза не всегда допустимо технологически.

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  $v_{cp}$ , так как для оптимизации режима необходимо знать, как изменяются значения токов  $I_{1(51)}$  и  $I_{1(49)}$  во всем диапазоне рабочих скоростей ветра. Строим матрицу плана для числа факторов  $N = 2$ , для чего воспользуемся полным факторным экспериментом  $2^2$ . Проводя аналогичные вычислительные эксперименты, получим:

$$I_{1(49)} = 32,5825 - 16,4175R'_2 + 11,4075v_{cp} - 5,0925R'_2v_{cp}; \quad (7)$$

$$I_{1(51)} = 34,9 - 18,65R'_2 + 15,4v_{cp} - 7,65R'_2v_{cp}; \quad (8)$$

$$I_{1(50)} = 152,9875 - 6,3125R'_2 + 78,2125v_{cp} - 4,4875R'_2v_{cp}; \quad (9)$$

$$I'_{2(49)} = 32,875 - 16,875R'_2 + 12,375v_{cp} - 5,375R'_2v_{cp}; \quad (10)$$

$$I'_{2(51)} = 36,8375 - 19,1625R'_2 + 15,5875v_{cp} - 7,9125R'_2v_{cp}; \quad (11)$$

$$I'_{2(50)} = 131,1375 - 5,7875R'_2 + 84,5625v_{cp} - 3,9125R'_2v_{cp}; \quad (12)$$

$$|S_{cp}| = (10,8625 + 6,5625R'_2 + 7,4625v_{cp} + 5,4125R'_2v_{cp}) \cdot 10^{-3}; \quad (13)$$

$$|\Delta S| = (48,625 + 5,625R'_2 + 22,625v_{cp} + 2,125R'_2v_{cp}) \cdot 10^{-4}. \quad (14)$$

Значения токов и скольжений для расчетной скорости ветра  $v_{cp} = 12$  м/с, при сопротивлениях  $R'_2 = R'_{2(0)}$  и  $R'_2 = 2R'_{2(0)}$  ( $R'_{2(0)} = 0,0209$  Ом – активное сопротивление короткозамкнутой обмотки ротора базовой машины), рассчитанные на основании (7)...(14), представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения токов и скольжений для расчетной скорости ветра

| Активное сопротивление обмотки ротора | Амплитудные значения гармоники тока статора частотой |                          |                          | Амплитудные значения гармоники тока ротора частотой |                           |                           | Среднее скольжение $ S_{cp} $ , о. е. | Пульсационное скольжение $ \Delta S $ , о. е. |
|---------------------------------------|--|--------------------------|--------------------------|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---|
|                                       | 50 Гц<br>$I_{1(50)}$ , А                             | 49 Гц<br>$I_{1(49)}$ , А | 51 Гц<br>$I_{1(51)}$ , А | 50 Гц<br>$I'_{2(50)}$ , А                           | 49 Гц<br>$I'_{2(49)}$ , А | 51 Гц<br>$I'_{2(51)}$ , А |                                       |   |
| $R'_2 = R'_{2(0)}$                    | 231,2  | 43,99                    | 50,3                     | 215,7   | 45,25                     | 48,425                    | 0,01832                               | 0,00712                                       |
| $R'_2 = 2R'_{2(0)}$                   | 220,4  | 22,48                    | 24                       | 206   | 23                        | 25,35                     | 0,0303                                | 0,0079  |

Электромагнитный момент и мощность определяются на основании известных соотношений [4]:

$$M = \frac{m_1 R'_2 (I'_2)^2}{2S\Omega_1}; \quad (15)$$

$$P_{эм} = M\Omega_1, \quad (16)$$

где  $m_1$  – число фаз генератора;  $I'_2$  – амплитудное значение исследуемой гармоники приведенного тока ротора;  $\Omega_1$  – синхронная частота вращения исследуемой гармоники;  $S$  – среднее или пульсационное скольжение генератора.

Потери мощности в генераторе

$$\Delta P_r = \Delta P_n + \Delta P_d + 3(I_1^2 R_1 + (I'_2)^2 R'_2), \quad (17)$$

где  $\Delta P_n$  и  $\Delta P_d$  – постоянные и добавочные потери соответственно;  $I_1$  и  $I'_2$  – действующие значения токов статора и ротора;  $R_1$  и  $R'_2$  – активные сопротивления обмоток статора и ротора. Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Значения потерь и генерируемых мощностей асинхронного генератора

| Активное сопротивление обмотки ротора | Электромагнитная мощность на частоте |                               |                               | Мощность, генерируемая в ЭС на частоте |                              |                              | Пульсация тока статора $\delta I_m, \%$ | КПД генератора $\eta_r, \%$ | Суммарные потери в генераторе $\Delta P_{r\Sigma}, \text{ кВт}$ |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|------------------------------|------------------------------|---|-----------------------------|---|
|                                       | 50 Гц $P_{эм50}, \text{ кВт}$        | 51 Гц $P_{эм51}, \text{ кВт}$ | 49 Гц $P_{эм49}, \text{ кВт}$ | 50 Гц $P_{350}, \text{ кВт}$           | 51 Гц $P_{351}, \text{ кВт}$ | 49 Гц $P_{349}, \text{ кВт}$ |   |                             |   |
| $R'_2 = R'_{2(0)}$                    | 79,613                               | 10,324                        | 9,015                         | 75,18                                  | 10,137                       | 8,864                        | 81,64                                   | 75,98                       | 4,768   |
| $R'_2 = 2R'_{2(0)}$                   | 87,813                               | 5,101                         | 4,198                         | 82,39                                  | 5,035                        | 4,142                        | 48                                      | 84,85                       | 5,536   |

Значения активных мощностей, генерируемых в энергосистему на частотах 50, 51, 49 Гц, равны:

$$P_{350} = P_{эм50} - \Delta P_{п50} - \Delta P_{д50} - 3I_{1(50)}^2 R_1; \quad (18)$$

$$P_{351} = P_{эм51} - \Delta P_{п51} - \Delta P_{д51} - 3I_{1(51)}^2 R_1; \quad (19)$$

$$P_{349} = P_{эм49} - \Delta P_{п49} - \Delta P_{д49} - 3I_{1(49)}^2 R_1, \quad (20)$$

где  $P_{эм50}, P_{эм51}, P_{эм49}$  – электромагнитные мощности токов частотами 50, 51, 49 Гц соответственно;  $\Delta P_{п50}, \Delta P_{п51}, \Delta P_{п49}$  – постоянные потери в генераторе от токов частотами 50, 51, 49 Гц соответственно;  $\Delta P_{д50}, \Delta P_{д51}, \Delta P_{д49}$  – добавочные потери в генераторе от токов частотами 50, 51, 49 Гц соответственно;  $I_{1(50)}, I_{1(51)}, I_{1(49)}$  – действующие значения токов статора частотами 50, 51, 49 Гц соответственно.

На основании (18)...(20) полезная активная мощность, генерируемая в энергосистему на основной частоте 50 Гц, составляет 75,18 кВт, а активная мощность, генерируемая токами высших гармоник и субгармоник, – 19 кВт. Они представляют собой дополнительные потери мощности в линиях, трансформаторах и других элементах энергосистемы.

Суммарные потери в асинхронном генераторе

$$\Delta P_{r\Sigma} = \Delta P_{r50} + \Delta P_{r51} + \Delta P_{r49}, \quad (21)$$

где  $\Delta P_{r50}$ ,  $\Delta P_{r51}$ ,  $\Delta P_{r49}$  – потери мощности в генераторе от гармоник частотами 50, 51, 49 Гц соответственно, которые определяются по (17).

Отметим, что величина максимально допустимых паспортных потерь рассматриваемого базового генератора составляет  $\Delta P_{\text{доп.г}} = 8,25$  кВт.

КПД генератора в квазиустановившемся режиме определяем

$$\eta_{\text{г}} = \frac{P_{350}}{P_{350} + P_{349} + P_{351} + \Delta P_{\text{г}\Sigma}} \cdot 100 \% . \quad (22)$$

Пульсацию тока статора генератора  $\delta I_m$  рассчитываем

$$\delta I_m = 2 \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} \cdot 100 \% , \quad (23)$$

где  $I_{\text{max}}$ ,  $I_{\text{min}}$  – соответственно максимальная и минимальная амплитуды тока.

Расчеты на основании (21)...(23) представлены в табл. 4.

Зависимость мощности  $P_{350}$  от величины активного сопротивления  $R'_2$  для рассматриваемого генератора 110 кВт при  $v_p = 12$  м/с представлена на рис. 2.

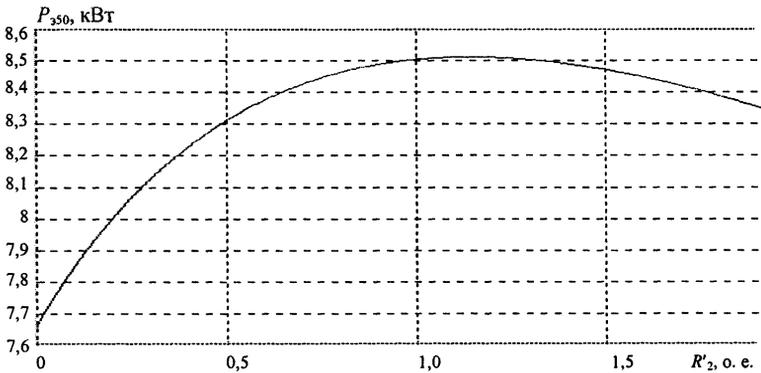


Рис. 2. Зависимость мощности  $P_{350}$  от величины активного сопротивления  $R'_2$  для асинхронного генератора ВЭУ-110 кВт при  $v_p = 12$  м/с.

Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении сопротивления ротора в два раза генерируемая в энергосистему мощность  $P_{350}$  увеличивается на 9,6 %; мощность потерь в энергосистеме, создаваемая токами высших и субгармоник, снижается на 52 %. При этом почти в два раза снижается пульсация тока статора генератора  $\delta I_m$ , следовательно, уменьшаются механические колебания и вибрация системы ветродвигатель – ротор генератора.

**Выбор оптимальной величины активного сопротивления обмотки ротора.** Оптимальная величина активного сопротивления обмотки короткозамкнутого ротора асинхронного генератора определяется с использованием целевой функции и поиска ее экстремумов. В качестве целевой функции принимается полезная мощность, генерируемая в энергосистему на частоте 50 Гц.

Согласно (15)...(18) имеем

$$P_{350} = \frac{3R'_2(I'_{2(50)})^2}{2S} - 0,005P_{\text{гн}} \left( \frac{I_{1(50)}}{I_{\text{н}}} \right)^2 - \Delta P_{\text{д50}} - 3I_{1(50)}^2 R_1. \quad (24)$$

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

$$I_{1(50)} = f_1(R'_2, v_{\text{ср}}); \quad (25)$$

$$I'_{2(50)} = f_2(R'_2, v_{\text{ср}}); \quad (26)$$

$$S = f_3(R'_2, v_{\text{ср}}). \quad (27)$$

Функции (25)...(27) получены по разработанной методике с проведением полного факторного эксперимента  $2^2$ . Максимум функции (24) определяется на основании соотношений:

$$\frac{\partial P_{350}}{\partial R'_2} = 0; \quad (28)$$

$$\frac{\partial P_{350}}{\partial v_{\text{ср}}} = 0; \quad (29)$$

$$\left( \frac{\partial^2 P_{350}}{\partial R'_2 \partial v_{\text{ср}}} \right)^2 - \frac{\partial^2 P_{350}}{\partial R'^2_2} \frac{\partial^2 P_{350}}{\partial v^2_{\text{ср}}} < 0; \quad (30)$$

$$\frac{\partial^2 P_{350}}{\partial R'^2_2} < 0; \quad (31)$$

$$\frac{\partial^2 P_{350}}{\partial v^2_{\text{ср}}} < 0. \quad (32)$$

Для поиска максимума функции с использованием математической системы MATLAB выражения (28)...(32) дополняются:

- условием допустимого нагрева генератора

$$\Delta P_{\text{г}\Sigma} \leq \Delta P_{\text{доп}}, \quad (33)$$

где  $\Delta P_{\text{доп}}$  – максимально допустимые паспортные потери рассматриваемого базового генератора;

- условием допустимой несинусоидальности формы кривой напряжения

$$\frac{100\%}{U_1} \sqrt{\sum_v^n U_v^2} \leq K_{\text{доп}}, \quad (34)$$

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

При определении суммарных потерь в генераторе  $\Delta P_{гг}$  и суммы гармоник в кривой напряжения  $\sum_v^n U_v^2$  используются полиномы вида (7)...(14), полученные при проведении полного факторного эксперимента  $2^2$ .

Таким образом, выражения (28)...(34) представляют собой условия выбора оптимальной величины активного сопротивления обмотки короткозамкнутого ротора асинхронного генератора системной ВЭУ.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана методика выбора оптимальной величины активного сопротивления обмотки короткозамкнутого ротора асинхронного электрогенератора системной ветроэнергетической установки.

2. При проектировании асинхронного генератора с повышенным активным сопротивлением обмотки короткозамкнутого ротора увеличивается мощность, генерируемая на частоте 50 Гц, и снижаются мощность потерь в энергосистеме, определяемая высшими гармониками и субгармониками, а также механические колебания и вибрации ветроагрегата.

3. Величина активного сопротивления обмотки короткозамкнутого ротора определяется аэродинамической характеристикой ветродвигателя, базовыми параметрами проектируемого генератора и величинами коэффициентов порывистости ветра на данной ветровой площадке.

## ЛИТЕРАТУРА

1. О л е ш к е в и ч М. М., М а к о с к о Ю. В. Моделирование квазиустановившихся режимов работы асинхронного генератора системного ветроагрегата // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2003. – № 3.
2. И в а н о в В. Н. К вопросу о числе превышений заданного уровня пульсационной скоростью ветра // Труды ИЭМ. – Вып. 27. – 1972.
3. К р а с о в с к и й Г. И., Ф и л а р е т о в Г. Ф. Планирование эксперимента. – Мн.: Изд-во БГУ, 1982.
4. И в а н о в-С м о л е н с к и й А. В. Электрические машины: Учеб. для вузов. – М.: Энергия, 1980.

Представлена кафедрой  
электроснабжения

Поступила 20.05.2004