

УДК 621.658.012.531

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-4-61-68

Коэффициенты корреляции динамических звеньев роторных систем ветроэлектрической установки

В. И. Буяльский, кандидат технических наук, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Произведено обоснование определения коэффициентов корреляции динамических звеньев роторных систем ветроэлектрической установки как одной из подзадач востребованных для дальнейшей разработки математических алгоритмов динамического поведения системы с целью модификации автоматизированного управления ветроэлектрической установкой, которая обеспечивает уменьшение вибраций всех элементов роторных систем в условиях нагруженности привода при разных режимах эксплуатации энергоагрегата, что способствует улучшению показателей надежности составляющих частей современных ветроустановок.

Решена задача нахождения параметров аналитической модели корреляционной функции с целью определения корреляционных зависимостей между измеренными значениями метеорологического и электроэнергетического процесса с учетом требования минимума суммы квадратов невязок (погрешности аппроксимации) истинной и аппроксимирующей линий. Среднеквадратическое отклонение погрешности аппроксимации, метеорологического и электроэнергетического процесса на основе дискретной оценки ординат корреляционной функции аналитической модели функции не превышает 1 %.

Составлены математические формулы определения спектральной плотности входных и выходных случайных процессов, а также взаимной спектральной плотности входных и выходных случайных процессов динамических звеньев роторных систем на основе структурной схемы передаточных функций поведения системы с целью выявления степени корреляции передаточных функций.

Произведен анализ процессов входных и выходных сигналов передаточных функций относительно их когерентности на основе расчета коэффициентов корреляции динамических звеньев роторных систем с целью описания передаточной функции в рамках анализа вибрационных полей агрегата в целом, поскольку вибрации рождают не только лопасти, это часть, но и все элементы с роторными системами.

Ключевые слова: коэффициент корреляции, спектральная плотность, корреляционная функция, вибрация, ветротурбина, роторная система.

Введение

Современная технология производства электроэнергии путем использования энергии ветра имеет ряд проблем, которые негативным образом влияют на повышение эффективности преобразования энергии. Широко используемые методы управления ветроэнергетической установкой в условиях быстро изменяющихся ветровых и электрических нагрузок не обеспечивают должной стабильности частоты вращения ротора ветротурбины, что отрицательно влияет на надежность и продолжительность безаварийной работы ветроэлектрических агрегатов, экономии производимой электроэнергии при собственном потреблении, а также на эффективность использования энергии ветра. Решение этих проблем возможно лишь при наличии эффективного автоматизированного управления ветроэнергетической установкой [1–9].

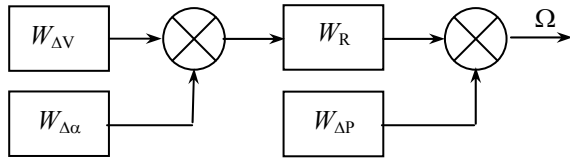
Цель выполненных исследований – найти коэффициенты корреляции динамических звеньев роторных систем ветроэлектрической установки, как одной из подзадач, востребованных для

дальнейшей разработки математических алгоритмов динамического поведения системы для модификации автоматизированного управления ветроэлектрической установкой, которая обеспечивает уменьшение вибраций всех элементов роторных систем в условиях нагруженности привода при разных режимах эксплуатации энергоагрегата, что способствует улучшению показателей надежности составляющих частей современных ветроустановок.

Определение корреляционных зависимостей между измеренными значениями метеорологического и электроэнергетического процесса

Повышение эффективности управления ветротурбиной на основе учета условий вибрационной нагруженности привода при разных условиях эксплуатации энергоагрегата требует проведения динамического анализа частотных взаимодействий всех элементов роторных систем и силовых взаимодействий от лопастных элементов, как одной из составляющих ветровой нагрузки. В работе автора в предыдущем номере

данного журнала представлена структурная схема передаточных функций динамических звеньев роторных систем ветрогенератора (рисунок).



Структурная схема передаточных функций роторных систем ветрогенератора
The block diagram of transfer functions rotor systems of wind-generator

Передаточные функции динамических звеньев роторных систем ветроагрегата имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} W_{\Delta V} &= \frac{0,25}{Tp+1} \Delta V_k; & W_{\Delta \alpha} &= \frac{0,86}{Tp+1} \Delta \alpha_k; \\ W_{\Delta P} &= \frac{0,007}{Tp+1} \Delta P_k; & W_R &= k(p), \end{aligned} \quad (1)$$

где $W_{\Delta V}$, $W_{\Delta P}$, $W_{\Delta \alpha}$, $W_{\Delta R}$ – соответственно, передаточные функции динамических звеньев роторных систем ветроагрегата, характеризующие влияние: скорости ветра V ; угла положения лопасти α ; величину потребляемой электроэнергии P ; безынерционного звена редуктора k .

Согласно [10] оценка количественной меры тесноты спектральной связи между динамическими звеньями определяется функцией когерентности. Функция когерентности (или квадрат когерентности) определяется выражением:

$$\gamma_{xy}^2(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_x(\omega)S_y(\omega)}, \quad (2)$$

где $S_x(\omega)$ и $S_y(\omega)$ – спектральные плотности входного и выходного сигналов динамических звеньев; $S_{xy}(\omega)$ – взаимная спектральная плотность входного и выходного сигналов динамических звеньев; ω – угловая частота.

Функция когерентности (2) для любых частот удовлетворяет неравенству

$$0 \leq \gamma_{xy}^2(f) \leq 1. \quad (3)$$

Согласно (3), если $\gamma_{xy}^2(\omega) \equiv 1$, то процессы $x(t)$ и $y(t)$ полностью когерентны. Если колебательные процессы статически независимы, то при всех значениях частоты $\gamma_{xy}^2(\omega) \equiv 0$.

Таким образом, функция когерентности имеет аналогию с коэффициентом корреляции и несет

информацию о степени корреляции передаточных функций, т. е. о степени линейной взаимосвязи двух процессов, но только в частотной области.

Спектральная плотность входного сигнала $S_x(\omega)$ связана с корреляционной функцией $R_x(\tau)$ взаимно-обратным преобразованием Фурье:

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (4)$$

где $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Следовательно, первичным в определении спектральной плотности входного сигнала динамического звена $W_{\Delta V}$ в (1) является определение корреляционных зависимостей между измеренными значениями метеорологического процесса. Дискретная оценка ординат корреляционной функции процесса выполнена в соответствии с формулой:

$$\bar{R} = \frac{1}{n-i} \sum_{k=1}^{n-i} y_k y_{k+i}, \quad (5)$$

где y_k – измеренное значение случайного процесса $x(\tau)$, $i=0, n-1$ – номер отсчета корреляционной функции.

В работе [11] задается аналитический вид корреляционной функции:

$$R(\tau) = \sigma^2 e^{-\beta|\tau|}, \quad (6)$$

как описывающий значительное количество гидрометеорологических и гидрофизических процессов. В (6) через σ^2 обозначена дисперсия процесса, τ – интервал корреляции, β – параметр модели.

Задача определения σ^2 и β корреляционной функции на основе значений ее оценок R_i решена с использованием метода наименьших квадратов.

Нахождение параметров аналитической модели корреляционной функции выполнено в соответствии с полученными формулами с учетом требования минимума суммы квадратов невязок (погрешности аппроксимации) истинной и аппроксимирующей линий. Для удобства вывода дисперсия обозначена через D . Линеаризация исходного вида корреляционной функции посредством логарифмирования уравнения (6):

$$\ln R = \ln D - \beta|\tau|.$$

Введем обозначения $R' = \ln R$, $D' = \ln D$. Тогда условие обращения суммы квадратов невязок (среднеквадратического отклонения погрешности аппроксимации)

$$\sigma_{\text{а.л}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R'_i - D' + \beta|\tau_i|)^2}{(n-1)}} \quad (7)$$

в минимум задано путем определения производных от (10) по каждому из параметров – D' и β [12]:

$$\frac{d\sigma_{\text{а.л}}^2}{dD'} = 0; \quad \frac{d\sigma_{\text{а.л}}^2}{d\beta} = 0; \quad \text{при} \quad \frac{d^2\sigma_{\text{а.л}}^2}{d(D')^2} > 0; \quad \frac{d^2\sigma_{\text{а.л}}^2}{d(\beta)^2} > 0, \quad (8)$$

где $\sigma_{\text{а.л}}$ – погрешность аппроксимации отсчетов \tilde{R}_x аналитической функцией (линией).

Определение производных выражения (7) в соответствии с условием (8) и дальнейшие преобразования полученных формул позволят сформировать систему уравнений для вычисления параметров D' и β аналитической модели в виде:

$$D'n - \beta \sum_{i=1}^n |\tau_i| = \sum_{i=1}^n \tilde{R}_i; \quad D' \sum_{i=1}^n |\tau_i| - \beta \sum_{i=1}^n |\tau_i|^2 = \sum_{i=1}^n \tilde{R}_i |\tau_i|. \quad (9)$$

Решение системы (9) методом Гаусса позволит получить выражение для определения параметров σ^2 и β в конечной форме:

$$\ln\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n R'_i + \beta \sum_{i=1}^n |\tau_i|}{n}; \quad \beta = \frac{n \sum_{i=1}^n R'_i |\tau_i| - \sum_{i=1}^n R'_i \sum_{i=1}^n |\tau_i|}{\left(\sum_{i=1}^n |\tau_i|\right)^2 - n \sum_{i=1}^n |\tau_i|^2}. \quad (10)$$

Формула (10) дает возможность аппроксимировать корреляционную функцию аналитической функцией с точностью, определяемой в (7).

Не снижая общности подхода, в соответствии с [13] интервал времени дискретной оценки ординат корреляционной функции (5) составляет $t = 60$ с, а расстояние между замерами значений скорости ветра, как реализация случайного процесса – $\tau = 1$ с.

Входным сигналом динамического звена $W_{\Delta P}$ (1) является величина потребляемой мощности, что обуславливает необходимость в определении спектральной плотности, а следовательно, и корреляционных зависимостей между измеренными значениями электроэнергетического процесса.

Согласно [14] величина потребляемой мощности, как и скорость ветра, имеет стохастический характер, таким образом, предложенный метод определения корреляционных зависимостей между измеренными значениями метеорологического процесса может быть применен и к электроэнергетическому процессу.

В таблице представлены результаты тестирования метеорологического и электроэнергетического процесса: дискретная оценка ординат корреляционной функции (5); аналитическая модель корреляционной функции (6); среднеквадратическое отклонение погрешности аппроксимации σ (7); выражение для определения параметров σ^2 и β в конечной форме (10).

Результаты тестирования

Test results

Время замеров t , с	Измеренные значения y_k , м/с	Оценка корреляц. функции \tilde{R} , м ² /с ²	Расчет корреляц. функции R , м ² /с ²	Измеренные значения y_k , кВт	Оценка корреляц. функции \tilde{R} , кВт ²	Расчет корреляц. функции R , кВт ²
1	13,0	169,5	169,4	110	11209,1	11206,5
5	13,3	168,9	168,7	108	11199,25	11186,2
10	13,3	168,7	168,3	110	11196,0	11169,9
15	12,9	169,1	168,4	102	11200,5	11161,5
20	12,4	169,2	168,2	110	11210,1	11158,0
25	13,6	169,0	167,7	109	11202,9	11137,8
30	12,9	169,4	167,9	106	11199,7	11121,7
35	13,3	169,8	168,1	103	11192,8	11101,9
40	13,8	169,7	167,7	105	11202,3	11098,4
45	13,0	169,4	167,1	107	11229,8	11112,7
50	12,3	170,4	167,9	108	11229,2	11099,1
55	13,6	174,5	171,8	105	11212,7	11069,9
60	12,8	166,4	163,5	107	11770,0	11606,6
		$\sigma = 0,008 \text{ м}^2/\text{с}^2$			$\sigma = 0,007 \text{ кВт}^2$	
		$\sigma^2 = 168,2 \text{ м}^2/\text{с}^2$			$\sigma^2 = 11147,0 \text{ кВт}^2$	
		$\beta = -0,00029 \text{ м}^2/\text{с}^2$			$\beta = -0,00023 \text{ кВт}^2$	

Следует отметить, что из-за большого количества значений параметров в таблицу внесены результаты только для каждого пятого временного отсчета.

Спектральная плотность входных сигналов динамических звеньев роторных систем

В результате подстановки выражения (6) в (4) спектральная плотность входного сигнала динамического звена $W_{\Delta V}$ (1) имеет вид:

$$S_{x\Delta V}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma^2 e^{-\beta|\tau|} e^{-j\omega\tau} d\tau = \\ = \frac{\sigma^2}{2\pi} \int_{-\infty}^0 e^{(\beta-j\omega)\tau} d\tau + \frac{\sigma^2}{2\pi} \int_0^{+\infty} e^{-(\beta+j\omega)\tau} d\tau. \quad (11)$$

Интервал интегрирования (11) разбит на две части. При $\tau < 0$ имеем $|\tau| = -\tau$, а при $\tau > 0$ – $|\tau| = \tau$. Проинтегрировав выражение (11), получим:

$$S_{x\Delta V}(\omega) = \frac{\sigma^2}{2\pi} \frac{e^{(\beta-j\omega)\tau}}{\beta-j\omega} \Big|_{-\infty}^0 - \frac{\sigma^2}{2\pi} \frac{e^{-(\beta+j\omega)\tau}}{\beta+j\omega} \Big|_0^{+\infty} = \\ = \frac{\sigma^2}{2\pi} \left(\frac{1}{\beta-j\omega} + \frac{1}{\beta+j\omega} \right) = \\ = \frac{2\sigma^2\beta}{2\pi(\omega^2 + \beta^2)} = \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)}.$$

Следовательно, формула определения спектральной плотности входного сигнала динамического звена $W_{\Delta V}$ (1) будет иметь вид

$$S_{x\Delta V}(\omega) = \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)}, \text{ м}^2/\text{с}^2. \quad (12)$$

На основе вышеизложенной аргументации о том, что метод определения корреляционных зависимостей между измеренными значениями метеорологического процесса может быть применен и к электроэнергетическому процессу, следует, что формула (12) может быть применима и для вычисления спектральной плотности входного сигнала динамического звена $W_{\Delta P}$ (1). Тогда формула определения спектральной плотности входного сигнала динамического звена $W_{\Delta P}$ (1) будет иметь вид

$$S_{x\Delta P}(\omega) = \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)}, \text{ Вт}^2. \quad (13)$$

В работе [15] предложена математическая модель процесса производства электроэнергии ветроэлектрическим агрегатом, отличающаяся тем, что метеопараметр, определяющий харак-

тер зависимости угловой скорости ротора ветроколеса от скорости ветра и угла положения лопасти, выбирается с возможностью заблаговременного определения изменения частоты вращения ветроколеса, что способствует учету динамических свойств системы для повышения оперативности принятия управляющих решений при переменных характеристиках метеорологических условий. Формула, определяющая характер зависимости угловой скорости ротора ветроколеса от скорости ветра и угла положения лопасти, имеет следующий вид:

$$\Omega = 119 \frac{ZE}{rib(1-E^2)} \frac{V}{\alpha}, \text{ рад/с}, \quad (14)$$

где Ω – угловая скорость; Z – коэффициента быстроходности ветротурбины; V – скорость ветра; α – угол положения лопасти; r – длина лопасти; i – количество лопастей ветротурбины; b – ширина лопасти; E – коэффициент торможения.

Угол положения лопасти α в соответствии с (14) определится как:

$$\alpha = 119 \frac{ZE}{rib(1-E^2)} \frac{V}{\Omega}, \text{ град}, \quad (15)$$

откуда следует, что угол положения лопасти в (15) находится в зависимости от изменения скорости ветра, а следовательно, от корреляционной функции (6), описывающей метеорологический процесс. Таким образом, спектральная плотность входного сигнала динамического звена $W_{\Delta\alpha}$ (1), может быть рассчитана с помощью спектральной плотности скорости ветра (12). После подстановки (12) в (15) получим формулу спектральной плотности входного сигнала динамического звена $W_{\Delta\alpha}$ (1):

$$S_{x\Delta\alpha}(\omega) = 119 \frac{ZE}{\Omega rib(1-E^2)} \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)}, \text{ град} \cdot \text{м/с}. \quad (16)$$

Согласно структурной схеме передаточных функций динамических звеньев роторных систем ветрогенератора (рис. 1) и линейной динамической системы следует, что спектральная плотность входного сигнала динамического безынерционного звена редуктора $W_{\Delta R}$ (1) может быть определена как сумма выходных спектральных плотностей динамических звеньев $W_{\Delta V}$ и $W_{\Delta\alpha}$. Спектральные плотности входного и выходного случайных процессов связаны равенством

$$S_y(\omega) = S_x(\omega) \cdot |\Phi(j\omega)|^2, \quad (17)$$

где $\Phi(j\omega)$ – частотная характеристика динамического звена, образованная в результате замены аргумента p в передаточной функции на аргумент $j\omega$.

После подстановки $W_{\Delta V}$, $W_{\Delta P}$, $W_{\Delta\alpha}$ (1), (12), (13), (16) в (17) получим:

1) спектральная плотность выходного сигнала звена $W_{\Delta V}$:

$$S_{y\Delta V}(\omega) = \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \left| \frac{0,25}{j\omega T + 1} \right|^2, \text{ м}^2/\text{с}^2; \quad (18)$$

2) спектральная плотность выходного сигнала звена $W_{\Delta P}$:

$$S_{y\Delta P}(\omega) = \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \left| \frac{0,007}{j\omega T + 1} \right|^2, \text{ Вт}^2; \quad (19)$$

3) спектральная плотность выходного сигнала звена $W_{\Delta\alpha}$:

$$S_{y\Delta\alpha}(\omega) = 119 \frac{ZE}{\Omega rib(1-E^2)} \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \left| \frac{0,86}{j\omega T + 1} \right|^2, \text{ град}\cdot\text{м}/\text{с}. \quad (20)$$

Просуммировав выражения (18) и (20), получим формулу спектральной плотности входного сигнала динамического безынерционного звена редуктора $W_{\Delta R}$ (1):

$$S_{x\Delta R}(\omega) = \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \times \left(\left| \frac{0,25}{j\omega T + 1} \right|^2 + 119 \frac{ZE}{\Omega rib(1-E^2)} \left| \frac{0,86}{j\omega T + 1} \right|^2 \right), \text{ град}\cdot\text{м}/\text{с}. \quad (21)$$

Подставив $W_{\Delta R}$ (1) и (21) в (17), получим спектральную плотность выходного сигнала звена $W_{\Delta R}$:

4) динамическое звено $W_{\Delta R}$:

$$S_{y\Delta R}(\omega) = \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \left(\left| \frac{0,25}{j\omega T + 1} \right|^2 + 119 \frac{ZE}{\Omega rib(1-E^2)} \left| \frac{0,86}{j\omega T + 1} \right|^2 \right) \left| \frac{20,8}{j\omega T\Delta R + 1} \right| \text{ град}\cdot\text{м}/\text{с}. \quad (27)$$

Подставив (12), (13), (16), (18)–(22), (24)–(27) в (2), получим:

1) коэффициент корреляции динамического звена $W_{\Delta V}$ (1):

$$S_{y\Delta R}(\omega) = \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \times \left(\left| \frac{0,25}{j\omega T + 1} \right|^2 + 119 \frac{ZE}{\Omega rib(1-E^2)} \left| \frac{0,86}{j\omega T + 1} \right|^2 \right) \times \left| \frac{20,8}{j\omega T\Delta R + 1} \right|^2, \text{ град}\cdot\text{м}/\text{с}, \quad (22)$$

где $W_{\Delta R} = k(j\omega) = \frac{20,8}{j\omega T\Delta R + 1}$; $T_{\Delta R}$ – постоянная времени затухания колебаний редуктора.

Коэффициенты корреляции динамических звеньев роторных систем

Для определения степени корреляции передаточных функций согласно выражению (2) необходимо вычислить взаимную спектральную плотность входного и выходного сигналов динамических звеньев $S_{xy}(\omega)$. Взаимная спектральная плотность входного и выходного случайных процессов связаны равенством

$$S_{xy}(\omega) = S_x(\omega) \cdot |\Phi(j\omega)|. \quad (23)$$

После подстановки $W_{\Delta V}$, $W_{\Delta P}$, $W_{\Delta\alpha}$, $W_{\Delta R}$ (1) и (12) в (22) получим взаимную спектральную плотность входного и выходного сигналов указанных звеньев:

1) динамическое звено $W_{\Delta V}$:

$$S_{xy\Delta V}(\omega) = \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \left| \frac{0,25}{j\omega T + 1} \right|, \text{ м}^2/\text{с}^2; \quad (24)$$

2) динамическое звено $W_{\Delta P}$:

$$S_{xy\Delta P}(\omega) = \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \left| \frac{0,007}{j\omega T + 1} \right|, \text{ Вт}^2; \quad (25)$$

3) динамическое звено $W_{\Delta\alpha}$:

$$S_{xy\Delta\alpha}(\omega) = 119 \frac{ZE}{\Omega rib(1-E^2)} \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \left| \frac{0,86}{j\omega T + 1} \right|, \text{ град}\cdot\text{м}/\text{с}; \quad (26)$$

$$\gamma_{xy\Delta V}^2(\omega) = \left| \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \left| \frac{0,25}{j\omega T + 1} \right| \right|^2 / \left| \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \left| \frac{0,25}{j\omega T + 1} \right| \right|^2; \quad (28)$$

2) коэффициент корреляции динамического звена $W_{\Delta P}$ (1):

$$\gamma_{xy\Delta P}^2(\omega) = \left| \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \left| \frac{0,25}{j\omega T + 1} \right| \right|^2 / \left| \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \left| \frac{0,25}{j\omega T + 1} \right| \right|^2; \quad (29)$$

3) коэффициент корреляции динамического звена $W_{\Delta\alpha}$ (1):

$$\gamma_{xy\Delta\alpha}^2(\omega) = \frac{\left| 119 \frac{ZE}{\Omega rib(1-E^2)} \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \left| \frac{0,86}{j\omega T + 1} \right| \right|^2}{119 \frac{ZE}{\Omega rib(1-E^2)} \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \cdot 119 \frac{ZE}{\Omega rib(1-E^2)} \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \left| \frac{0,86}{j\omega T + 1} \right|^2}; \quad (30)$$

4) коэффициент корреляции динамического звена $W_{\Delta R}$ (1):

$$\gamma_{xy\Delta R}^2(\omega) = \frac{\left| \frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \left(\left| \frac{0,25}{j\omega T + 1} \right|^2 + 119 \frac{ZE}{\Omega rib(1-E^2)} \left| \frac{0,86}{j\omega T + 1} \right|^2 \right) \left| \frac{20,8}{j\omega T \Delta R + 1} \right|^2 \right|^2}{\left(\frac{\sigma^2\beta}{\pi(\omega^2 + \beta^2)} \right)^2 \left(\left| \frac{0,25}{j\omega T + 1} \right|^2 + 119 \frac{ZE}{\Omega rib(1-E^2)} \left| \frac{0,86}{j\omega T + 1} \right|^2 \right) \left| \frac{20,8}{j\omega T \Delta R + 1} \right|^2}. \quad (31)$$

Таким образом, в выражениях (28)–(31) числитель и знаменатель сокращаются, следовательно, функция когерентности (2) составляет единицу, что характеризует выполнение условия (3).

Анализ полученных результатов и выводы

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– обоснована задача нахождения коэффициентов корреляции динамических звеньев роторных систем ветроэлектрической установки, как одной из подзадач востребованных для дальнейшей разработки математических алгоритмов динамического поведения системы для модификации автоматизированного управления ветроэлектрической установкой;

– решена задача, нахождения параметров аналитической модели корреляционной функции с целью определения корреляционных зависимостей между измеренными значениями метеорологического и электроэнергетического процесса (среднеквадратическое отклонение погрешности аппроксимации не превышает 1 %);

– произведено описание математических формул для определения спектральной плотности входных и выходных сигналов, а также взаимной спектральной плотности входных и выходных сигналов динамических звеньев роторных систем;

– выполнен расчет коэффициентов корреляции динамических звеньев роторных систем, из которых следует, что процессы входных и выходных сигналов передаточных функций полностью когерентны.

Полученные результаты исследований востребованы для дальнейшей разработки математических алгоритмов динамического поведения системы.

Библиографические ссылки

1. Шнеерсон Р. М. Разработка гибридного ветроэнергетического комплекса для электроснабжения удаленных потребителей Мурманской области // Вестник науки Сибири. 2015. № 15. С. 55–58.
2. Пионкевич В. А. Математическое моделирование ветротурбины для ветроэнергетической установки с асинхронным генератором методом частотных скоростных характеристик // Вестник ИРГТУ. 2016. № 3. С. 83–88.
3. Степанов С. Ф., Павленко И. М., Ербаев Е. Т. Обеспечение эффективной работы мультимодульной ветроэлектростанции при изменении скорости ветра и нагрузки // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 93–94.
4. Суяков С. А. Проблемы интеграции ветроустановок в единую энергетическую систему России // Инженерный вестник Дона. 2014. № 3. С. 10–23.
5. Emadifar R., Tohidi D., Eldoromi M. Controlling Variable Speed Wind Turbines Which Have Doubly Fed Induction Generator by Using of Internal Model Control

Method // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2016. No. 5. Pp. 3464-3471.

6. Balamurugan N., Selvaperumal S. Intelligent controller for speed control of three phase induction motor using indirect vector control method in marine applications // Indian journal of Geo Marine Sciences. 2018. No. 47. Pp.1068-1074.

7. Vijayalaxmi B., Bheema K. Individual Pitch Control of Variable Speed Wind Turbines Using Fuzzy Logic with DFIG // International Journal of research in advanced engineering technologies. 2016. No. 5. Pp. 45-52.

8. Subbaian V., Sasidhar S. Maximum energy capture of variable speed variable pitch wind turbine by using RBF neural network and fuzzy logic control // International Research Journal of Engineering and Technology. 2015. No. 2. Pp. 493-500.

9. Haiying D., Lixia Y., Guohan Y., Hongwei L. Wind Turbine Active Power Control Based on Multi-Model Adaptive Control // International Journal of Control and Automation. 2015. No. 8. Pp. 273-284.

10. Бендат Дж., Персол А. Приложения корреляционного и спектрального анализа. М. : Мир, 1983. 312 с.

11. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов исследования случайных функций / Р. Отнес, Л. Эноксон. М. : Энергия, 1979. 320 с.

12. Доценко С.В. Случайные процессы в гидрофизических измерениях. Л. : Гидрометиздат, 1983. 239 с.

13. Буяльский В. И. Комбинированный метод управления ветротурбиной // Энергетик. 2016. № 4. С. 18–20.

14. Буяльский В. И. Комбинированный метод управления ветротурбиной // Энергетик. 2016. № 4. С. 18–20.

15. Буяльский В. И. Методика для устранения запаздывания включения устройства разворота лопастей ветротурбины // Энергетик. 2014. № 5. С. 33–35.

References

1. Schneerson R.M. [Development of a hybrid wind power complex for power supply to remote consumers of the Murmansk region]. *Vestnik nauki Sibiri*. 2015. No. 15. Pp. 12-15 (in Russ.).

2. Pionkevich V.A. [Mathematical modeling of a wind turbine for a wind power plant with an asynchronous generator by the method of frequency speed characteristics]. *Vestnik IrGTU*. 2016. No. 3. Pp. 35-37 (in Russ.).

3. Stepanov S.F., Pavlenko I.M., Erbaev E.T. [Ensuring efficient operation of a multimodule wind farm when

wind speed and load change]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013. No. 6. Pp. 22-27 (in Russ.).

4. Suyakov S.A. [Problems of integration of wind turbines into the unified energy system of Russia]. *Ingenerniy vestnik Dona*. 2014. No. 3. Pp. 10-12 (in Russ.).

5. Emadifar R., Tohidi D., Eldoromi M. Controlling Variable Speed Wind Turbines Which Have Doubly Fed Induction Generator by Using of Internal Model Control Method. In International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2016. No. 5. Pp. 3464-3471.

6. Balamurugan N., Selvaperumal S. Intelligent controller for speed control of three phase induction motor using indirect vector control method in marine applications. In Indian journal of Geo Marine Sciences. 2018. No. 47. Pp.1068-1074.

7. Vijayalaxmi B., Bheema K. Individual Pitch Control of Variable Speed Wind Turbines Using Fuzzy Logic with DFIG. In International Journal of research in advanced engineering technologies. 2016. No. 5. Pp. 45-52.

8. Subbaian V., Sasidhar S. Maximum energy capture of variable speed variable pitch wind turbine by using RBF neural network and fuzzy logic control. In International Research Journal of Engineering and Technology. 2015. No. 2. Pp. 493-500.

9. Haiying D., Lixia Y., Guohan Y., Hongwei L. Wind Turbine Active Power Control Based on Multi-Model Adaptive Control. In International Journal of Control and Automation. 2015. No. 8. Pp. 273-284.

10. Bendat Dg., Persol A. *Prilogeniya korrelyatsionnogo i spektralnogo analiza* [Appendices of the correlation and spectral analysis]. Moscow: Mir Publ., 1983. 312 p. (in Russ.).

11. Otnes R., Enoxon L. *Prikladnoy analiz vremennih ryadov issledovaniya sluchynih funktsiy* [The applied analysis of time numbers of research of stochastic functions]. Moscow: Energiya Publ., 1979. 320 p. (in Russ.).

12. Docenko S.V. *Sluchynie processy v hidrofizicheskikh izmereniyah* [Casual processes in hydrophysical measurements]. Leningrad: Hidrometizdat, 1983, 239 p. (in Russ.).

13. Buyalsky V.I. [Combined wind turbine control method]. *Energetik*. 2016. No. 4, pp. 18-20 (in Russ.).

14. Buyalsky V.I. [Combined wind turbine control method]. *Energetik*. 2016. No. 4, pp. 18-20 (in Russ.).

15. Buyalsky V. I. [A technique for eliminating the delay in turning on the device for turning the blades of a wind turbine]. *Energetik*. 2014. No. 5. Pp. 33-35 (in Russ.).

* * *

Factors of Correlation for Dynamic Links of Rotor Systems of Wind Electric Installation

V. I. Buyalsky, PhD in Engineering, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

The substantiation of definition of correlation factors for dynamic links of rotor systems of wind electric installations, as one of subtasks of the mathematical algorithms of dynamic behavior of system claimed for the further working out for the purpose of automated control updating for the wind-electric installation which provides reduction of vibrations of all elements of rotor systems in conditions of loading a drive at different modes of operation of the energy-unit that promotes improvement of indicators of reliability for components of the modern wind installations is made.

The problem of determining the parameters of the analytical model of the correlation function for the purpose of definition of correlation dependences between the measured values of meteorological and electro-power process taking into account the requirement of a minimum of the sum of squares of discrepancies (approximation errors) for the actual and approximating lines is solved. The average square deviation of an error of approximation, meteorological and electro-power process on the basis of a discrete estimation of ordinates of the analytical model of the correlation function does not exceed 1%.

Mathematical formulas for definition of the spectral density of input and target casual processes, and also mutual spectral density of input and target casual processes of dynamic links of rotor systems on the basis of the block diagram of transfer functions of the system behavior for the purpose of revealing the degree of correlation of transfer functions are made.

The analysis is made for processes of input and target signals of transfer functions with regard to their coherent state on the basis of calculation of factors of correlation for dynamic links of rotor systems for the purpose of the description of the transfer function within the limits of the analysis of vibrating fields of the unit as a whole since vibrations are caused not only by blades but also by all elements with rotor systems.

Keywords: correlation factor, spectral density, correlation function, vibration, wind turbine, rotor system.

Получено: 04.10.2021