

УДК 669.187.2

Козлов Александр Николаевич

Амурский государственный университет

г. Благовещенск, Россия

E-mail: kozlov1951@yandex.ru

Козлова Татьяна Сергеевна

ПАО «Дальневосточная энергетическая компания»

г. Благовещенск, Россия

E-mail: omed2@amur.dvec.ru

Kozlov Alexander Nikolaevich

Amur State University

Blagoveshchensk, Russia

E-mail: kozlov1951@yandex.ru

Kozlova Tatyana Sergeevna

Far Eastern Energy Company PJSC

Blagoveshchensk, Russia

E-mail: omed2@amur.dvec.ru

ЭТАЛОННАЯ МОДЕЛЬ ФАЗНЫХ ТОКОВ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

REFERENCE MODEL OF PHASE CURRENTS OF ARC STEEL FURNACE

Аннотация. Показана возможность выполнить расчет случайной составляющей токов прямой последовательности (первой гармонике) фаз А, В и С дуговой сталеплавильной печи, применяя корреляционный анализ.

Abstract: The possibility of calculating the random component of the positive sequence currents (first harmonic) of phases A, B and C of an electric arc furnace using correlation analysis is shown.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, случайные составляющие токов, моделирование, корреляционный анализ, спектральная плотность, система компьютерной математики Maple.

Key words: electric arc furnace, random components of currents, modeling, correlation analysis, spectral density, Maple computer mathematics system.

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) являются мощными потребителями электроэнергии со случайным характером нагрузки. Как следствие, кривые тока и напряжения несинусоидальны. Моделирование случайного стационарного процесса рассмотрено в [1], слу-

чайных составляющих токов ДСП с помощью цифровых фильтров – в [2], а в [3] определены параметры математической модели фильтра. Применим корреляционный анализ и используем результаты, полученные в [1, 2, 3] для расчета случайной составляющей токов прямой последовательности (первой гармоники) фаз А, В и С.

Корреляционный анализ [4], наряду со спектральным [4], играет большую роль в теории сигналов. Смысл его состоит в количественном измерении степени сходства различных сигналов. Корреляционная функция показывает степень сходства между сигналом и его сдвинутой копией – чем больше значение корреляционной функции, тем это сходство сильнее [4, 5].

На втором этапе найдем спектральную плотность дискретного случайного процесса путем применения теоремы Винера – Хинчина [4] к полученной на первом этапе оценке корреляционной функции этого процесса. Важным свойством спектральной функции является то, что она относится к разряду неотрицательных.

Алгоритм расчета значений корреляционной функции значительно проще, чем значений спектральной плотности. Кроме того, график корреляционной функции позволяет, на основании визуальной оценки, определить необходимую и достаточную сложность состава математической модели токов.

Расчет корреляционной функции

Корреляционная функция $R(kT)$, как и исходный цифровой сигнал $r(nT)$, является суммой произведений вида $R_k \delta(t - nT)$ и, аналогично [1, формула (18)], определяется как [6]:

$$R_x(kT) = \frac{1}{N-k} \sum_{n=1}^{N-k} x(nT)x((n+k)T), \quad k = 0 \dots N_k, \quad (1)$$

где N_k – число сдвигов по времени.

В системе *Maple* [8] данную функцию можно реализовать следующим образом:

$$Rx := \left[seq \left(\frac{1}{N-i} \cdot sum \left(\frac{x[j] \cdot x[j+1]}{Dx}, j = 1 .. N-i \right), i = 0 .. Nk \right) \right].$$

При моделировании случайной составляющей токов ДСП на основании нормированного расчетного спектра и $T = \frac{3}{16000} c$ достаточно принять $N_k = 40$. С увеличением объема выборки N отличие корреляционных функций моделируемого процесса и фильтра уменьшается. В этом можно убедиться, рассматривая рис. 1.

Для $N = 50000$ максимальное значение относительной ошибки корреляционной функции моделируемого процесса (рис. 2) равно 8%, т.е. погрешности дисперсии моделируемого процесса.

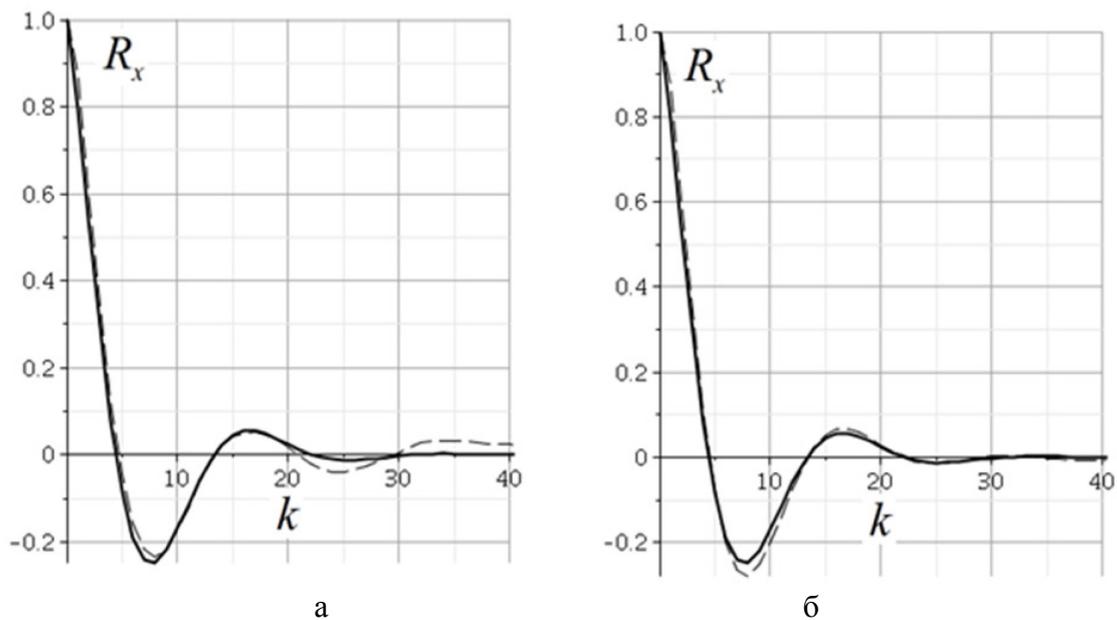


Рис. 1. Корреляционные функции: сплошная линия – график для аналогового фильтра, а штриховая – моделируемый процесс; по оси абсцисс отложены номера сдвигов по времени: а) – при $N = 8000$; б) – при $N = 50000$.

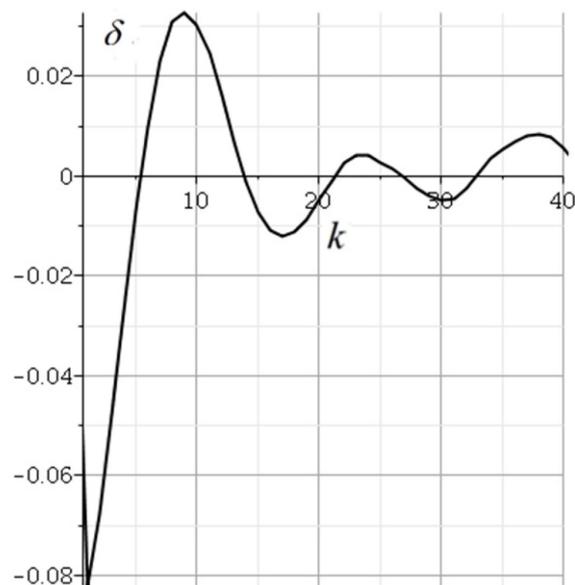


Рис. 2. График относительной ошибки корреляционной функции моделируемого процесса.

Расчет спектральной плотности

Спектральную плотность дискретной последовательности можно находить непосредственно по этой последовательности с помощью, например, быстрого преобразования Фурье [4, 6]. Возможен и второй метод – вычисление спектральной плотности с помощью применения преобразования Фурье к корреляционной функции [5, 6, 7]. Этот метод позволяет произвести расчет спектральной плотности гораздо быстрее, чем первый, так как число принимаемых во внимание отсчетов корреляционной функции N_k значительно меньше объема выборки исходной цифровой последовательности.

Корреляционная функция является четной. Ее нулевой элемент $R(0)$ имеет множитель R_0 , равный дисперсии процесса, а все остальные элементы с номерами $(+k)$ и $(-k)$ образуют пары: $R(kT) = R(-kT)$. Используя это равенство, из известного выражения [4, 6, 7], связывающего корреляционную функцию случайного дискретного сигнала $r(nT)$ со спектральной плотностью $S_r(\omega)$

$$S_r(\omega) = T \sum_{k=-\infty}^{\infty} R(kT) e^{-j\omega kT}, \quad (2)$$

можно получить выражение для нахождения графика спектральной плотности моделируемого процесса:

$$S_x(m\Delta\omega) = TR(0) + 2 \sum_{k=1}^{N_s} R_x(kT) \cos(\Delta\omega kmT), \quad m = 0 \dots N_m, \quad (3)$$

где $\Delta\omega$ – интервал круговой частоты; m – номер отсчета аргумента спектральной плотности; N_m – количество этих отсчетов; N_s – максимальный номер используемого отсчета корреляционной функции; $\Delta\omega N_m = \omega_m$ – максимальное значение круговой частоты. В качестве ω_m выбирается такое значение, при котором модульная функция аналогового фильтра меньше 1% от ее максимума. Для уменьшения погрешности спектральной плотности может производиться усечение корреляционной функции, когда $N_s < N_m$ [6].

Далее приведена реализация (3) в системе компьютерной математики *Maple* [8]:

$$\omega_{max} := 10000 : Nm := 200 : d\omega := \frac{\omega_{max}}{Nm} :$$

$$Sx := [seq(T \cdot Rx[1] + 2 \cdot T \cdot (sum(Rx[k] \cdot cos((k-1) \cdot T \cdot m \cdot d\omega)), k = 2..Ns), m = 0..Nm)],$$

где $d\omega$ – дискретизация по частоте.

На рис. 3 приведены графики спектральной плотности моделируемого процесса и соответствующего ему расчетного нормированного спектра.

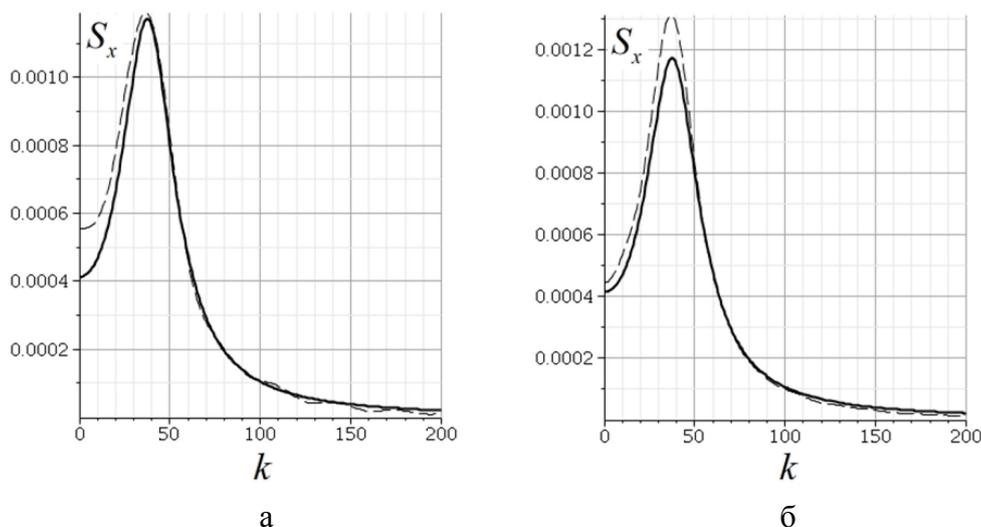


Рис. 3. Графики расчетного нормированного спектра (сплошные линии) и спектральной плотности моделируемого процесса (штриховые линии); по оси абсцисс отложены номера отсчетов по круговой частоте: а – при $N = 8000$; б – при $N = 50000$.

Ординаты графиков спектральной плотности получены делением найденных по формуле (3) значений на начальное значение соответствующей корреляционной функции, т.е. на дисперсию D_x . Такая операция обеспечивает уменьшение максимальной погрешности.

Для уменьшения погрешности спектральной плотности может производиться усечение корреляционной функции, когда $N_s < N_m$. В частности, для рассматриваемого примера наибольшее значение относительной погрешности спектральной плотности при $N_s = 30$ составило 11% (рис. 4).

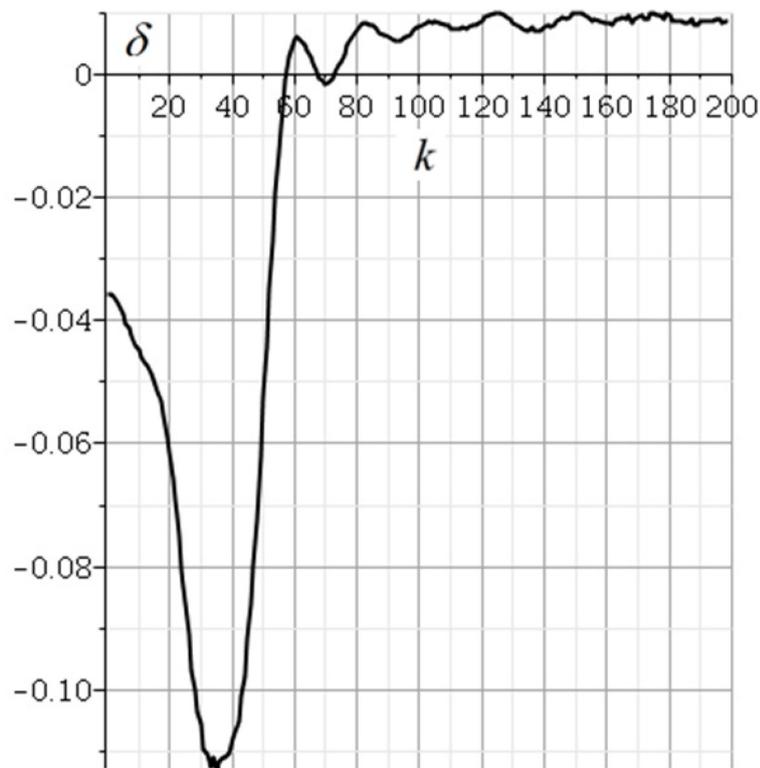


Рис. 4. График относительной ошибки спектральной плотности моделируемого процесса.

Таким образом, можно рекомендовать выполнение цифрового моделирования случайной составляющей токов ДСП при $N = 50000$. Дальнейшее увеличение объема выборки не обеспечивает заметного повышения точности моделирования, но приводит к существенному росту времени расчета.

Расчет случайной составляющей токов прямой последовательности (первой гармоники) фаз А, В и С

Как указывалось ранее [9, 10], среднее квадратическое значение модуля изображающего вектора для рассматриваемой выборки равно 3050 А. Было установлено, что среднее для 50 периодов дискретизации T_d значение модуля этого вектора является амплитудно-модулированным, причем основная часть модулирующей функции – синусоида AI_f с частотой $32 / 7$ Гц (примерно 4,57 Гц) и амплитудой 920 А. Половина периода этой субгармоники составляет 350 интервалов, ее нулевые значения приходятся на пятый и 355-й отсчеты. Можно округленно, с погрешностью 1,8%, считать частоту субгармоники равной 60/12,

т.е. 5 Гц.

Среднее значение AI_m графика AI после исключения из него субгармоники AI_{lf} составляет 2823 А. Дисперсия D_{v0} значений AI после вычитания из них AI_m и AI_{lf} равна 640000 А^2 , а среднее квадратическое значение σ указанной разности составляет 800 А. Делением значений разности $AI - AI_{lf} - AI_m$ на σ образуется нормированная центрированная последовательность переменной составляющей модуля изображающего вектора тока $x[n]$. График последней величины приведен в [10, см. рис. 2, б].

Случайные составляющие токов фаз А, В и С (рис. 5) находятся как проекции равномерно вращающегося с частотой источника случайной составляющей изображающего вектора тока. Суммированием случайных и регулярных составляющих фазных токов определяются значения полной математической модели токов ДСП.

Для фазы А выражение для построения графика случайной составляющей токов прямой последовательности первой гармоники принимает следующий вид:

$$i_a = (AI_m + x(kT)) \cdot \cos(\phi(i)), \quad (4)$$

где $x(kT)$ – сигнал на выходе цифрового фильтра, $\cos(\phi)$ – фазовый угол.

Применительно к токам прямой последовательности для фазы В из фазового угла выражения (4) вычитается угол $2\pi/3$, а для фазы С этот угол прибавляется.

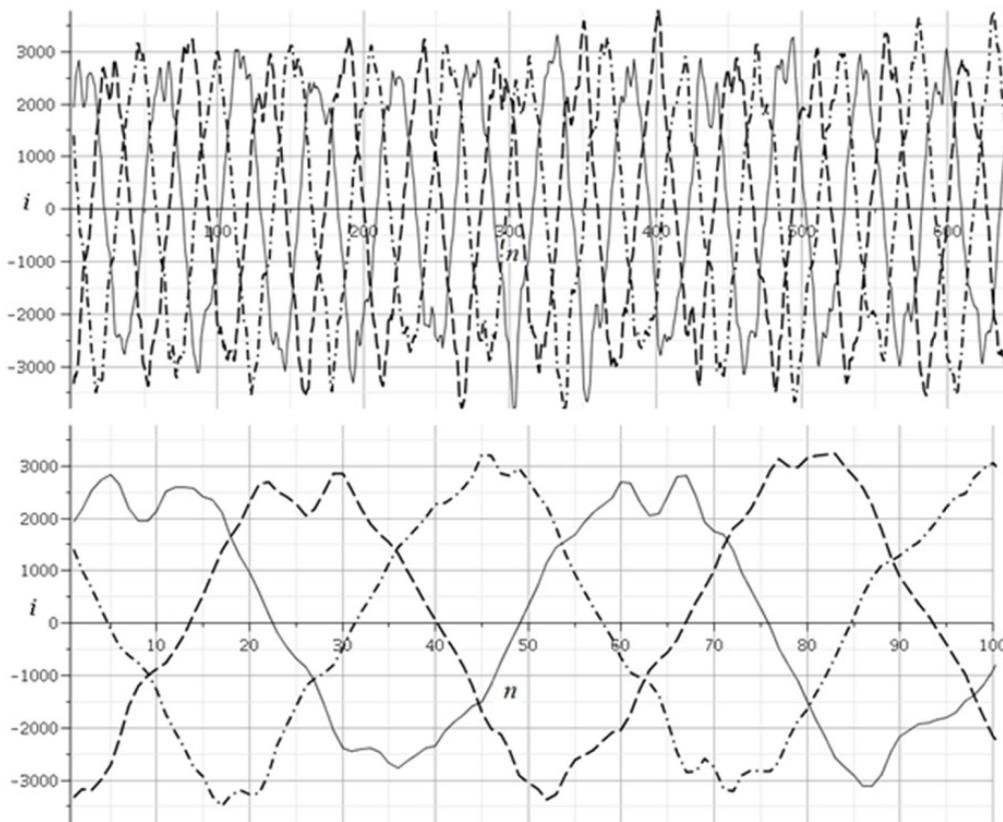


Рис. 5. Случайные составляющие токов прямой последовательности первой гармоники фаз А, В и С: фазы А – сплошная линия, фазы В – штриховая, фазы С – штрихпунктирная.

Набор перечисленных составляющих образует эталонную модель фазных токов ДСП. Для печных трансформаторов с другими номинальными значениями токов и напряжений первичной обмотки можно использовать эту же модель. Однако амплитуды составляющих фазных токов указанной модели необходимо пересчитать. Такую операцию выполняют, используя отношения номинальных значений указанных токов и напряжений для какой-либо из эталонных дуговых сталеплавильных печей.

1. Козлов, А.Н., Козлова, Т.С. Математическая модель случайной составляющей токов дуговой сталеплавильной печи // Вестник АмГУ. Серия «Естественные и экономические науки». – 2023. – Вып. 101. – С. 78-82.
2. Козлов, А.Н., Козлова, Т.С. Моделирование случайной составляющей токов дуговой сталеплавильной печи // Вестник АмГУ. Серия «Естественные и экономические науки». – 2024. – Вып. 105. – С. 126-130.
3. Козлов А.Н., Козлова, Т.С. Определение параметров фильтра, формирующего нерегулярный случайный процесс // Вестник АмГУ. Серия «Естественные и экономические науки». – 2023. – Вып. 103. – С. 38-41.
4. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.: ил.
5. Теория автоматического управления: В 2-х ч. – Ч. II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления. / под ред. А.А. Воронова. – М.: Высшая школа, 1986. – 504 с.: ил.
6. Кувшинов, Г.Е., Наумов, Л.А., Чупина, К.В. Системы управления глубиной погружения буксируемых объектов: монография. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 285 с.
7. Математические основы теории автоматического регулирования/ В.А. Иванов, В.С. Медведев, Б.К. Чемоданов. – М.: Высшая школа, 1971. – 806 с.
8. Дьяконов, В.П. Maple 9,5/10 в математике, физике и образовании – М.: СОЛОН-Пресс, 2006. – 720 с.
9. Белоконь, В.И., Козлова, Т.С., Кувшинов, Г.Е., Савина, Н.В. Изображающий вектор токов дуговой электрической печи. // Научное обозрение. – 2012. – Вып. 5.
10. Козлова, Т.С., Кувшинов, Г.Е., Савина, Н.В. Применение изображающего вектора и корреляционного анализа для создания математической модели токов дуговой сталеплавильной печи // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Материалы конференции. – Благовещенск: Амурский. гос. университет, 2013. – С. 186-196.