

УДК 669.187.2

**Козлов Александр Николаевич**

Амурский государственный университет

г. Благовещенск, Россия

E-mail: [kozlov1951@yandex.ru](mailto:kozlov1951@yandex.ru)**Козлова Татьяна Сергеевна**

ПАО «Дальневосточная энергетическая компания»

г. Благовещенск, Россия

E-mail: [omed2@amur.dvec.ru](mailto:omed2@amur.dvec.ru)**Kozlov Alexander Nikolaevich**

Amur State University

Blagoveshchensk, Russia

E-mail: [kozlov1951@yandex.ru](mailto:kozlov1951@yandex.ru)**Kozlova Tatyana Sergeevna**

Far Eastern Energy Company PJSC

Blagoveshchensk, Russia

E-mail: [omed2@amur.dvec.ru](mailto:omed2@amur.dvec.ru)**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРА, ФОРМИРУЮЩЕГО  
НЕРЕГУЛЯРНЫЙ СЛУЧАЙНЫЙ ПРОЦЕСС****DETERMINING THE PARAMETERS OF THE FILTER  
FORMING AN IRREGULAR RANDOM PROCESS**

*Аннотация. Рассмотрено определение параметров математической модели фильтра, позволяющего преобразовать сигнал, спектральная плотность которого постоянна на всех частотах («белый шум»), в случайный стационарный процесс.*

*Abstract. The determination of the parameters of a mathematical model of a filter is considered, which allows converting a signal whose spectral density is constant at all frequencies (the so-called “white noise”) into a random stationary process.*

*Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, нерегулярный случайный процесс, белый шум, передаточная функция.*

*Key words: arc steel furnace, irregular random process, white noise, transfer function.*

**DOI: 10.22250/20730268\_2023\_103\_38**

В работе [1] были предложены рекомендации, позволяющие получить сигнал, близкий к идеальному дискретному «белому шуму» со спектральной плотностью, равной единице.

Преобразование белого шума, спектральная плотность которого близка к единице, в случайный процесс осуществляется с помощью фильтра, у которого квадрат модуля частотной характеристики (называемый модульной функцией) равен спектральной плотности случайной составляющей. Переход от спектральной плотности к передаточной функции фильтра возможен, если спектральная плотность является рациональной четной функцией угловой частоты [2].

Из модульной функции в общем случае можно получить различные передаточные функции: устойчивые или неустойчивые, минимальной или неминимальной фазы [3]. Естественно, что для формирующего фильтра следует выбирать устойчивую передаточную функцию, полюсы которой

имеют отрицательную действительную часть. Обязательным условием этого признака является то, что все коэффициенты полинома знаменателя передаточной функции должны быть положительными. (Если все эти коэффициенты отрицательны, то можно выделить общий сомножитель (-1) и отнести его к числителю передаточной функции). В противном случае при генерировании случайной цифровой последовательности возникает расходящийся вычислительный процесс, который приводит к безграничному росту получаемых отсчетов и остановке вычислений [2].

У передаточной функции минимальной фазы все нули имеют отрицательную действительную часть и все коэффициенты полинома числителя положительны. У передаточной функции неминимальной фазы одно из этих условий нарушается. Числитель передаточной функции находится на основании числителя рационального выражения спектральной плотности по тем же правилам, которые позволяют определить знаменатель передаточной функции по знаменателю спектральной плотности [2].

Спектральная плотность случайной составляющей токов дуговой сталеплавильной печи описывается выражением [4]:

$$S(\omega) = \frac{2D_x(\alpha^2 + \beta^2 + \omega^2)}{\omega^4 + 2(\alpha^2 + \beta^2)\omega^2 + (\alpha^2 + \beta^2)^2}. \quad (1)$$

График соответствующей спектральной плотности представлен на рис. 1.

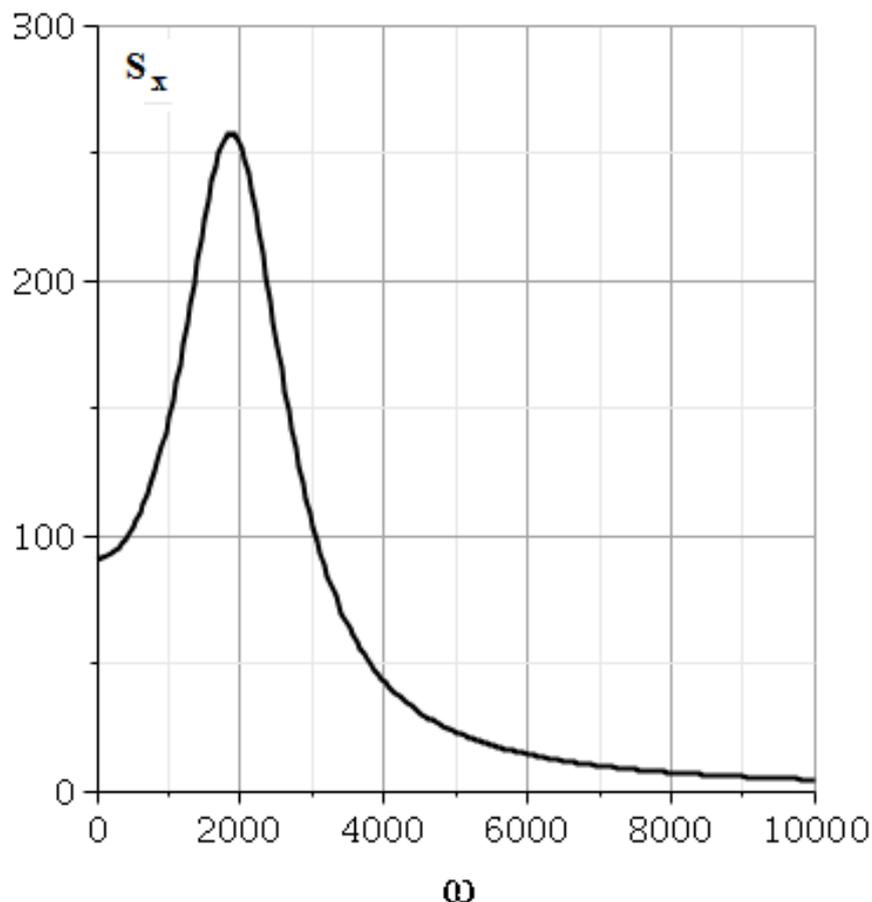


Рис. 1. График нормированной спектральной плотности случайной составляющей токов ДСП.

Применим изложенные выше правила к рациональной аппроксимации нормированного спектра (1), в котором используется относительная угловая частота  $x$ .

В [2] показан метод, при котором применяются спектральные функции следующего вида:

$$s(x) = A_s \cdot \frac{\prod_k (x^2 + l_{sk}) \cdot \prod_i (x^4 + m_{1i}x^2 + m_{oi})}{\prod_j (x^4 + n_{1j}x^2 + n_{oj})}, \quad (2)$$

где все  $l_{sk}$  – неотрицательные величины;  $m_{oi}$  и  $n_{oj}$  – положительные числа;  $n_{1j}$  – действительное число, которое больше  $(-2\sqrt{n_{oj}})$ , а  $m_{1i}$  – действительное число, которое больше  $(-2\sqrt{m_{1i}})$ . При нарушении любого из двух последних условий функция (2) не является модульной – на некотором отрезке оси  $x^2$  она имеет отрицательное значение [2].

Для этого аппроксимация кажущегося спектра сначала приводится к общему знаменателю, а затем числитель найденного выражения раскладывается на множители вида  $(x^2 + l_{sk})$  и  $(x^4 + m_{1i}x^2 + m_{oi})$ . У аппроксимации нормированного расчетного спектра (1) сомножитель  $(x^4 + m_{1i}x^2 + m_{oi})$  отсутствует, а у всех сомножителей вида  $(x^2 + l_{sk})$  свободные члены  $l_{sk}$  равны нулю [2].

Передаточная функция аналогового формирующего фильтра, соответствующего спектральной плотности (1), имеет вид:

$$W_f(s) = A_f \frac{\prod_k (s + l_{fk})}{\prod_j (s^2 + b_{1j}s + b_{oj})}, \quad (3)$$

Модульная функция связана с частотной характеристикой уравнением [2, 5]:

$$s(x) = W_f(jx)W_f(-jx), \quad (4)$$

Из этого уравнения находятся следующие соотношения [2]:

$$\begin{aligned} A_f &= \sqrt{A_s}, \\ l_{fk} &= \sqrt{l_{sk}}, \\ b_{oi} &= \sqrt{n_{oi}}, \\ b_{1i} &= \sqrt{2\sqrt{n_{oi}} + n_{1i}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставляя (5) в (3), получим передаточную функцию формирующего фильтра:

$$W_f(s) = \frac{\sqrt{2D_x\alpha} \cdot (s + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2})}{s^2 + \sqrt{2\sqrt{(\alpha^2 + \beta^2)^2} + (2\alpha^2 - 2\beta^2)} \cdot s + \sqrt{(\alpha^2 + \beta^2)^2}}, \quad (6)$$

где  $\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} = \omega_0$  – угловая частота, близкая к угловой частоте максимума спектра.

Выполнив подстановку  $s = j\omega$  в выражение (6), можно проверить правильность подобранных коэффициентов формирующего фильтра. На рис. 2 видно, что кривые графика спектральной плотности и частотной характеристики формирующего фильтра совпали, из чего можно сделать вывод, что коэффициенты рассчитаны верно.

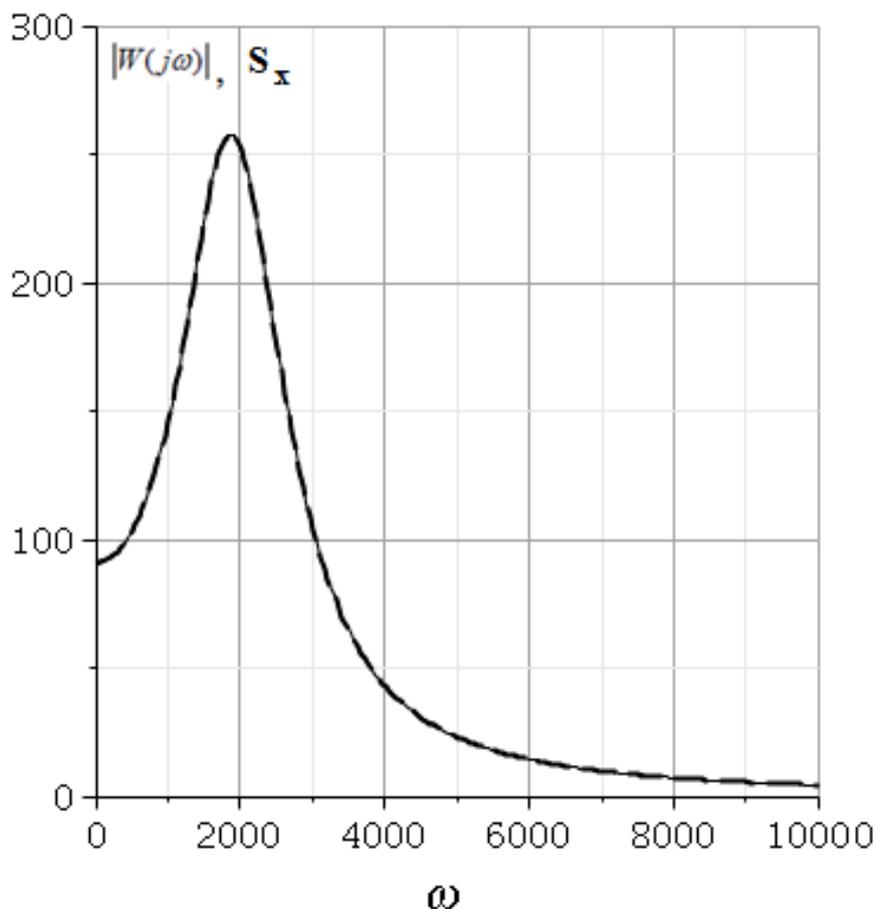


Рис. 2. График спектральной плотности случайной составляющей токов ДСП (сплошная линия) и амплитудная частотная характеристика формирующего фильтра (штриховая линия).

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. Кувшинов, Г.Е., Наумов, Л.А., Чупина, К.В. Системы управления глубиной погружения буксируемых объектов: монография. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 285 с.
3. Ортюзи, Ж. Теория электронных цепей. – Т. II. Синтез. – М.: Мир, 1971. – 548 с.
4. 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.
5. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.: ил.