

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА «ПАРЦИАЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ» ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Черникова Л. В.

Донецкий государственный технический университет

lida@elf.dgtu.donetsk.ua

The paper describes estimation of electromagnetic compatibility in networks with arc steel furnaces by voltage oscillation dose. It is realized by means of dynamic EMC model. Initial data for calculation are individual diagram of furnaces current dose. They are determined by correlative function of furnaces load by "partial reactions" method. The results may be used in designing of power supply networks with arc steel furnaces.

Постановка задачи. Широко используемые на производстве дуговые сталеплавильные печи (ДСП) имеют резко переменную нагрузку, что вызывает колебания напряжения в электрических сетях. Колебания напряжения (помехи) влияют на работу других электроприемников, подключенных к сети электроснабжения, и, следовательно, нарушается электромагнитная совместимость (ЭМС). В [1] нормируется доза колебаний ψ_U напряжения, которая оценивает дополнительное утомление человека от быстрых изменений яркости ламп при изменении напряжения на их зажимах.

Рекомендуемые в [1] методы расчета дозы колебаний напряжения по спектральной плотности напряжения требуют специальной подготовки пользователей. Следует также отметить, что приведенная в [1] формула (5) имеет существенные недостатки. В частности, входящая в эту формулу спектральная плотность $S(f, t)$ каждый раз определяется для определенного момента времени t , то есть в зоне стационарности, хотя рассматривается нестационарный процесс.

В [2] предложено расчет доз колебаний напряжения производить по индивидуальным графикам доз колебаний ψ_I тока ДСП. Эти графики могут быть получены с помощью фликерметра с токовым входом. Но по причине отсутствия фликерметров в существующей практике проектирования в качестве исходных данных используются корреляционные функции (КФ) $K_I(\tau)$ действующих значений I токов печей.

В связи с этим возникает необходимость в определении доз колебаний тока по КФ нагрузок ДСП. Применение для этой цели общих формул теории случайных процессов сопряжено с трудностями [2]. Поэтому в данной статье предлагается использовать метод «парциальных реакций» [3]¹.

Динамическая модель ЭМС. Объективная оценка ЭМС достигается путем использования динамических моделей объектов. В рассматриваемом случае доза колебаний напряжения определяется как процесс на выходе динамической модели, состоящей из линейного фильтра, квадратора и блока непрерывного осреднения на интервале $\theta = 10$ мин (рис. 1).

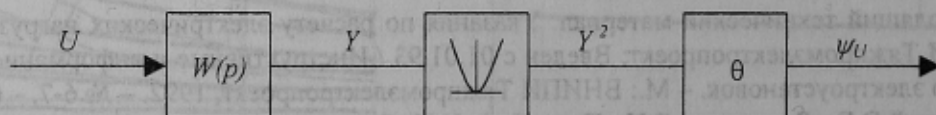


Рисунок 1 – Динамическая модель для оценки ЭМС ДСП

На вход модели поступает напряжение U сети. Фильтр моделирует реакцию зрения на быстрые изменения освещенности, а квадратор и блок непрерывного осреднения – дополнительное утомление человека, которые начинают проявляться через 10 мин после возникновения колебаний.

Передаточная функция фильтра динамической модели ЭМС

$$W(p) = \frac{k_\psi \cdot T_2 p \cdot (T_5 p + 1)}{(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1) \cdot (T_3 p + 1) \cdot (T_4 p + 1)}, \quad (1)$$

где $k_\psi = 1,748$, $T_1 = 0,015$ с, $T_2 = 0,017$ с, $T_3 = 0,13$ с, $T_4 = 0,00726$ с, $T_5 = 0,07$ с.

Поскольку фильтр не пропускает медленно изменяющиеся составляющие напряжения, то вместо $u(t)$ можно использовать процесс изменения потерь напряжения ΔU в сети. В проектировании потери напряжения определяются по нагрузке и сопротивлению сети. Так как в модели имеется квадратор, то переход от доз колебаний тока к искомым дозам колебаний напряжения производится умножением на квадрат сопротивления сети.

Такие динамические модели применимы для оценки не только колебаний напряжения, но также несимметрии и несинусоидальности напряжения, которая обусловлена наличием высших гармоник в сети.

¹ Задача в такой постановке предложена проф. Куренным Э. Г.

Поэтому при оценке несинусоидальности на вход фильтра будет подаваться не действующее, а мгновенное значение напряжения, что необходимо учитывать при построении модели объекта.

Корреляционная функция нагрузки ДСП обычно является экспоненциально-косинусоидальной [4, 5]:

$$K_I(t, \tau) = D_I(t) e^{-\alpha(t)|\tau|} \cos \omega_0(t) \tau, \quad (2)$$

где $D_I(t)$ – дисперсия нагрузки печи;

$\alpha(t)$ и $\omega_0(t)$ – параметры КФ.

Параметры КФ задаются либо в виде непрерывных функций времени, либо график нагрузки печи разбивается на участки (зоны стационарности), в пределах которых значения этих параметров принимаются неизменными.

Так как интервал осреднения $\theta = 10$ мин намного превышает среднюю длительность колебаний, то для определения дозы колебаний в соответствии с формулой

$$\psi(t) = \frac{1}{\theta} \int_{t-\theta}^t D_Y(t) dt \quad (3)$$

достаточно рассмотреть процесс изменения во времени дисперсии D_Y реакции фильтра на помеху.

Доза колебаний нагрузки. Для определения дисперсии реакции в [3] был предложен метод «парциальных реакций». Сущность метода заключается в том, что линейный фильтр динамической модели ЭМС представляется в виде параллельно включенных инерционных звеньев первого порядка с коэффициентами передачи a и постоянными времени J .

В данном случае фильтр раскладывается на четыре инерционных звена. Параметры первого звена определяются согласно следующим выражениям:

$$a_1 = \frac{-k_\psi (T_5 p_1 + 1)}{T_2 T_3 T_4 (p_1 - p_2)(p_1 - p_3)(p_1 - p_4)}; \quad J_1 = -\frac{1}{p_1}; \quad \gamma_1 = \frac{1}{J_1} = -p_1, \quad (4)$$

где p_1, \dots, p_4 – корни знаменателя передаточной функции (1).

Параметры остальных трех звеньев определяются аналогично.

Дисперсии реакции отдельных звеньев на помеху и взаимный корреляционный момент между попарно взятыми i -ым и r -ым звеньями определяются по формулам:

$$D_{y_i}(t) = a_i^2 \gamma_i^2 \iint_0^t e^{-\gamma_i u} e^{-\gamma_i v} K_I(u-v) du dv; \quad (5)$$

$$k_{ir}(t) = a_i a_r \gamma_i \gamma_r \iint_0^t e^{-\gamma_i u} e^{-\gamma_r v} K_I(u-v) du dv, \quad (6)$$

где u и v – переменные интегрирования.

После подстановки в эти формулы выражения (2) и двойного интегрирования получим:

$$D_{y_i}(t) = D_I(t) a_i^2 \gamma_i^2 \left\{ \frac{1}{\rho_{1i}^2(t) + \omega_0^2(t)} \left[\rho_{1i}(t) - e^{-t \rho_{1i}(t)} \left[\rho_{1i}(t) \cos \varphi(t) - \omega_0(t) \sin \varphi(t) \right] \right] + \frac{e^{-2\gamma_i t}}{\rho_{2i}^2(t) + \omega_0^2(t)} \left[\rho_{2i}(t) - e^{-t \rho_{2i}(t)} \left[\rho_{2i}(t) \cos \varphi(t) + \omega_0(t) \sin \varphi(t) \right] \right] \right\}. \quad (7)$$

$$k_{ir}(t) = D_I(t) a_i a_r \frac{\gamma_i \gamma_r}{\gamma_i + \gamma_r} \left\{ \frac{1}{\rho_{1i}^2(t) + \omega_0^2(t)} \left[\rho_{1i}(t) - e^{-t \rho_{1i}(t)} \left[\rho_{1i}(t) \cos \varphi(t) - \omega_0(t) \sin \varphi(t) \right] \right] + \frac{1}{\rho_{1r}^2(t) + \omega_0^2(t)} \left[\rho_{1r}(t) - e^{-t \rho_{1r}(t)} \left[\rho_{1r}(t) \cos \varphi(t) - \omega_0(t) \sin \varphi(t) \right] \right] + \frac{e^{-(\gamma_i + \gamma_r)t}}{\rho_{2i}^2(t) + \omega_0^2(t)} \left[\rho_{2i}(t) - e^{-t \rho_{2i}(t)} \left[\rho_{2i}(t) \cos \varphi(t) + \omega_0(t) \sin \varphi(t) \right] \right] + \frac{e^{-(\gamma_i + \gamma_r)t}}{\rho_{2r}^2(t) + \omega_0^2(t)} \left[\rho_{2r}(t) - e^{-t \rho_{2r}(t)} \left[\rho_{2r}(t) \cos \varphi(t) + \omega_0(t) \sin \varphi(t) \right] \right] \right\}, \quad (8)$$

где $\rho_{1i}(t) = \gamma_i + \alpha(t)$; $\rho_{2i}(t) = \gamma_i - \alpha(t)$; $\rho_{1r}(t) = \gamma_r + \alpha(t)$; $\rho_{2r}(t) = \gamma_r - \alpha(t)$; $\varphi(t) = t \omega_0(t)$.

Потому при оценке несущеспособности на вход фидера будет подвигаться не действующая, а эффективная мощность, значение которой необходимо учитывать при построении модели фидера.

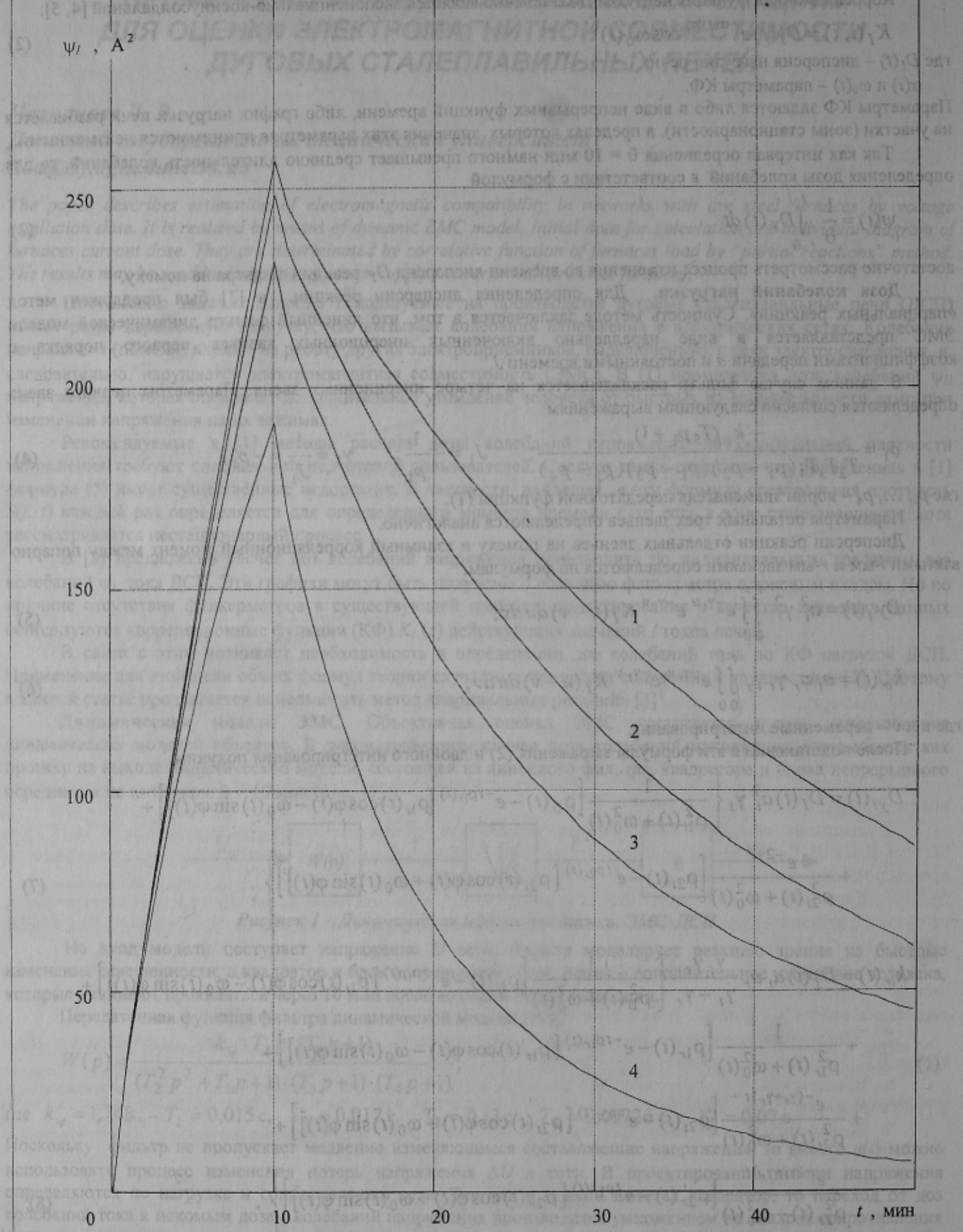


Рисунок 2 – Графики доз колебаний тока печи для разной длительности периода расплавления:
 1 – $t_r = 200$ мин; 2 – $t_r = 150$ мин; 3 – $t_r = 100$ мин; 4 – $t_r = 50$ мин.

Искомая дисперсия реакции на выходе фильтра модели ЭМС

$$D_Y(t) = \sum_{i=1}^4 D_{y_i}(t) + 2 \sum_{i \neq r}^6 k_{ir}(t). \quad (9)$$

Таким образом, мы получаем график дисперсии реакции фильтра, путем непрерывного осреднения которого на интервале θ согласно выражению (3) строится график дозы колебаний нагрузки ДСП.

В качестве примера рассмотрим печь ДСП 5 тонн, которая питается от сети электроснабжения 6 кВ, если эксплуатационный ток короткого замыкания равен 510 А, время расплавления:

$$t_{p1} = 200 \text{ мин}; \quad t_{p2} = 150 \text{ мин}; \quad t_{p3} = 100 \text{ мин}; \quad t_{p4} = 50 \text{ мин}.$$

Ток I ДСП имеет корреляционную функцию вида (2), параметры которой определяются следующими выражениями:

$$D_I(t) = 0,0315 i_k^2 e^{-2,6 t/t_p} \text{ A}^2; \quad \alpha(t) = 0,7 + e^{-4 t/t_p} \text{ c}^{-1}; \quad \omega_0(t) = 1,88 - 1,66 t/t_p \text{ c}^{-1},$$

где i_k – эксплуатационный ток короткого замыкания;

t_p – время расплавления.

Используя формулы (4), (7) – (9) и (3), получим графики доз колебаний тока печи для разной длительности периода расплавления (рис. 2).

Доза колебаний напряжения. Расчет доз колебаний нагрузки от группы n дуговых сталеплавильных печей производится методами, аналогичными методам расчета электрической нагрузки [1]. При $n \leq 3$ по графикам индивидуальных доз определяются плотности вероятностного распределения доз, по которым методом композиции находится распределение суммарных доз колебаний нагрузки. По заданной граничной вероятности E_x определяется расчетное максимальное значение дозы нагрузки, умножением которого на квадрат сопротивления сети вычисляется искомая доза колебаний напряжения. В ГОСТ $E_x = 0,05$.

При $n > 3$ распределение суммарных доз близко к нормальному, поэтому в расчетах достаточно использовать среднее значение ψ_{Ic} и дисперсию $D\psi_I$ индивидуальных доз нагрузки. Для группы печей соответствующие характеристики получаются суммированием индивидуальных характеристик. При $E_x = 0,05$ расчетное значение дозы вычисляется по формуле

$$\psi_{I\Sigma_{\max}} = \sum_{Ic}^n \psi_{Ic} + 1,65 \sqrt{\sum D\psi_I}. \quad (10)$$

ЭМС соблюдается, если расчетные значения доз колебаний напряжения не превышают допустимых значений, приведенных в ГОСТ.

Вывод. При оценке электромагнитной совместимости дуговых сталеплавильных печей построение индивидуальных графиков нагрузки ДСП целесообразно осуществлять с помощью метода «парциальных реакций», который дает точное решение и позволяет избежать сложных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 13109-87 «Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения». – Введ. 01.01.89.
2. Шидловский А. К., Куренный Э. Г. Введение в статистическую динамику систем электроснабжения. – Киев: Наукова думка, 1984. – 272 с.
3. Черникова Л. В. Линейная фильтрация случайных электроэнергетических процессов. Метод «парциальных реакций» // Труды Донецкого государственного технического университета. Серия: Электротехника и энергетика, 1999, выпуск 4, с. 217 – 220.
4. Алексеев С. В., Трейвас В. Г. Статистические характеристики токов дуг дуговых сталеплавильных печей. – Изв. вузов. Электромеханика, 1971, № 1, с. 78 – 82.
5. Влияние дуговых электропечей на системы электроснабжения / Ю. Л. Рыжнев, Р. В. Минеев и др.; Под. ред. М. Я. Смелянского и Р. В. Минеева. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.