

# АНАЛИЗ МОДЕЛИ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МОЩНОЙ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Цыганаш В.Е.

Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

E-mail: said@draw.donetsk.ua

*Abstract. Ziganash V. The analysis of model of a power electrical chain of powerful electrothermal installation. A qualitative analysis of the process of getting a curve at the exit of narrow-stripped modeled filter is given*

**Постановка задачи.** Широкие возможности модулированных фильтров [1] можно эффективно использовать в моделях, предназначенных для определения отклонений по мощности от оптимального электрического режима в силовых цепях электротермических установок (ЭТУ) [2, 3]. Чтобы использовать эти возможности в полном объеме, необходимо на микроуровне иметь математическое описание процессов, происходящих в таком фильтре. Решение задачи осложняется тем, что это параметрическая модель, содержащая управляемый колебательный контур (КК) и управляемый по частоте генератор синусоидальных колебаний.

Воздействия, характеризующие ток и напряжение силовой цепи ЭТУ, поступают одновременно на входы модели [3]. При этом сигнал, представляющий ток, преобразуется с помощью генератора в частотно-модулированный сигнал, который поступает непосредственно в КК, а сигнал, представляющий напряжение, воздействует на индуктивность КК, изменяя его резонансную частоту. В результате процессы, происходящие во временной области, в КК преобразуются в частотную область, и на выходе модели может быть сформирован сигнал, характеризующий оптимальное решение и отклонения от него. Модель в такой форме хорошо себя зарекомендовала при опытно-промышленных испытаниях на ЭТУ, но ее аппаратная реализация достаточно сложна.

**Целью настоящей работы** является анализ и экспериментальная проверка математической модели, описывающей внутренний механизм преобразования входных процессов в выходные.

**Основное содержание.** Известно [3], что на макроуровне модель характеризует коэффициент использования мощности источника питания  $K_n(t)$ ,

представляющий отношение мощности потребляемой установкой к мощности, которая задана источнику питания. Поскольку  $K_n(t)$  представляет собой отношение мощностей, то его можно представить в “квадратах”  $K_n(t) \cong i^2/i_0^2$ , где  $i$  — текущее значение тока КК, соответствующее текущему электрическому режиму в установке,  $i_0$  — значение тока модели в режиме резонанса, соответствующее оптимальному электрическому режиму в установке. Так как моделируемые сигналы представлены в частотной области, то, преобразуя это отношение к уравнению приведенной резонансной кривой, можно получить [4]

$$\frac{i^2}{i_0^2} = \frac{1}{1+Q^2 \cdot (1-K)^2},$$

где  $Q$  — добротность КК при резонансе,  $K = \omega^2/\omega_0^2$  — характеризует отношение текущего значения частоты  $\omega$  к резонансному значению  $\omega_0$ , возведенное в квадрат. Эта формула описывает модель извне и делает упор на совместное поведение всех ее элементов, раскрывая связь между входами и выходом.

В ее структуре уже изначально заложена возможность присутствия обобщённой функции (функции в точке), в частности, при определённых условиях дельта-функции П. Дирака  $\delta(\omega)$ . Для получения условий, при которых правая часть формулы могла бы включать  $\delta(\omega)$ , необходима очень высокая добротность КК и его работа в режимах близких к следящим [1]. Оба эти условия в процессе работы модели соблюдаются.

Для выходного сигнала модели, снимаемого с индуктивности КК, можно

записать:

$$U(t) = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d(Li)}{dt} = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} \cong L\Delta i + i\Delta L, \quad (1)$$

где  $\psi$  — потокосцепление катушки контура КК;  $d, \Delta$  — оператор дифференцирования и символ приращения величины.

Исходя из геометрической интерпретации составляющих  $U(t)$  и симметрии их влияния на процессы в контуре, ограничимся рассмотрением только одной из них. Так, для тока, поступающего в КК от управляемого генератора, можно записать

$$i = i_m \sin \int_0^t \omega_1 dt,$$

где  $i_m$  — амплитудное значение тока,  $\omega_1$  — мгновенная частота, являющаяся следствием воздействия на модель первого входного сигнала. Тогда для приращения тока получаем  $\Delta i \cong \omega_1 i_m \cos \int_0^t \omega_1 dt$ . Поскольку второй сомножитель составляющей ( $L$ ) принимается фиксированным, для составляющей в целом можно записать

$$V = \omega_1 \Phi(\omega_1 t).$$

Ясно [5], что площадь, заключённая между графиком функции  $V$  и осью абсцисс, при растяжении кверху увеличится в  $\omega_1$  раз, а при сжатии с боков уменьшится во столько же раз, т.е. в конечном счёте останется без изменения. Другими словами, это функция, принимающая на узком участке большие значения, причем эти значения согласованы с шириной участка так, что выполняется основное свойство  $\delta$ -функции. Для неё характерны и другие особенности. Так, при этом функция принимает и отрицательные значения. Её дельта-образность при больших значениях  $\omega$  обеспечивается не быстрым убыванием функции, а её частыми колебаниями, из-за которых она на конечном расстоянии от  $\omega_0$  при интегрировании “всё равно, что тождественный нуль” [5].

Симметричность влияния на процессы в КК находит отражение и в симметрии огибающих. Причем огибающие из-за вращения векторов могут менять своё положение относительно друг друга, так как составляющие формулы (1) могут менять величину и знак. В результате поочередного появления “точек” в огибающих завершается процесс перехода в частотную область и формируется из непрерывного сигнала дискретный сигнал, представляющий последовательность отсчетов. Таким образом, информация о взаимодействующих входных сигналах модели представляется в форме огибающей на ее выходе.

Математическая интерпретация этих процессов наиболее полно проявляется при переходе к комплексным значениям независимого переменного. Этот переход вскрывает внутренний механизм функционирования и взаимодействия между сигналами силовой цепи установки и выходным сигналом модели. Учитывая, что  $U(t)$  характеризуется не только величиной, но и направлением, выделим действительную часть  $x$  и мнимую часть  $y$ . Тогда положим

$$U(t) = x + jy = \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \left( \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} + j \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right); \quad (2)$$

первый множитель как положительное действительное число имеет действительный логарифм и характеризует амплитуду выходного сигнала модели, а второй множитель, модуль которого равен единице, имеет, как известно из математики, чисто мнимый логарифм  $j\varphi_0$ , причём  $\varphi_0$  получается из уравнений

$$\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \cos \varphi_0, \quad \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \sin \varphi_0.$$

Подчеркнём, что между амплитудой и фазой выходного сигнала модели существует однозначная связь, поскольку в КК физически реализуется условие Д. Гильберта. Ввиду того, что в величину  $\varphi_0$  входит слагаемым произвольное целочисленное кратное  $2\pi$ , формула (2) даёт все значения точек огибающих, укладывающихся на интервале, определяемом периодом входного сигнала.

В общем случае для амплитуды выходного сигнала модели, находящейся под воздействием двух входных сигналов, в покоординатной форме можно записать [6]

$$\tilde{U} = U_0 \cos \int_0^t [(\omega_1 - \omega_2)/2] dt,$$

где  $\tilde{U}$  — амплитуда огибающей выходного напряжения модели;  $U_0$  — амплитуда огибающей выходного напряжения модели при резонансном режиме КК;  $\omega_1 = \omega_0 + a_1 \cos \Omega t$ ,  $\omega_2 = \omega_0 + a_2 \cos(\Omega t + \varphi_0)$  — мгновенные частоты, являющиеся следствием воздействия на модель соответственно первого и второго входных сигналов;  $a_1 \cos \Omega t$ ,  $a_2 \cos(\Omega t + \varphi_0)$  — соответственно первое и второе входные воздействия, представленные в частотной области;  $a_1$ ,  $a_2$  — амплитудные значения девиации частоты входных воздействий;  $\Omega$  — частота входного сигнала, равная в данном случае промышленной частоте силовой цепи установки;  $\varphi_0$  — фазовый сдвиг между входными воздействиями, представленный в частотной области.

Правомерность такого подхода к процессам, происходящим в КК, можно подтвердить экспериментально. Так, например, если между входными воздействиями имеется только фазовый сдвиг, т.е.  $\varphi_0 \neq 0$ ,  $a_1 = a_2$ , то для огибающей выходного напряжения можно записать

$$\tilde{U} = U_0 \cos \frac{a_1}{\Omega} \left[ \sin\left(-\frac{\varphi_0}{2}\right) \cos\left(\Omega t + \frac{\varphi_0}{2}\right) \right].$$

Если принять во внимание параметры модели и то, что частота входных воздействий равна 50Гц, а фазовый сдвиг между ними равен  $\varphi$ , получим

$$\tilde{U} = 1,6 \cos 1,6 [\sin(-0,5\varphi_0) \cdot \cos(100\pi t + 0,5\varphi_0)].$$

Результаты проверки этой зависимости для различных значений фазового угла  $\varphi$  (градусы) и  $\varphi_0$  (радианы) приведены на рисунке 1.

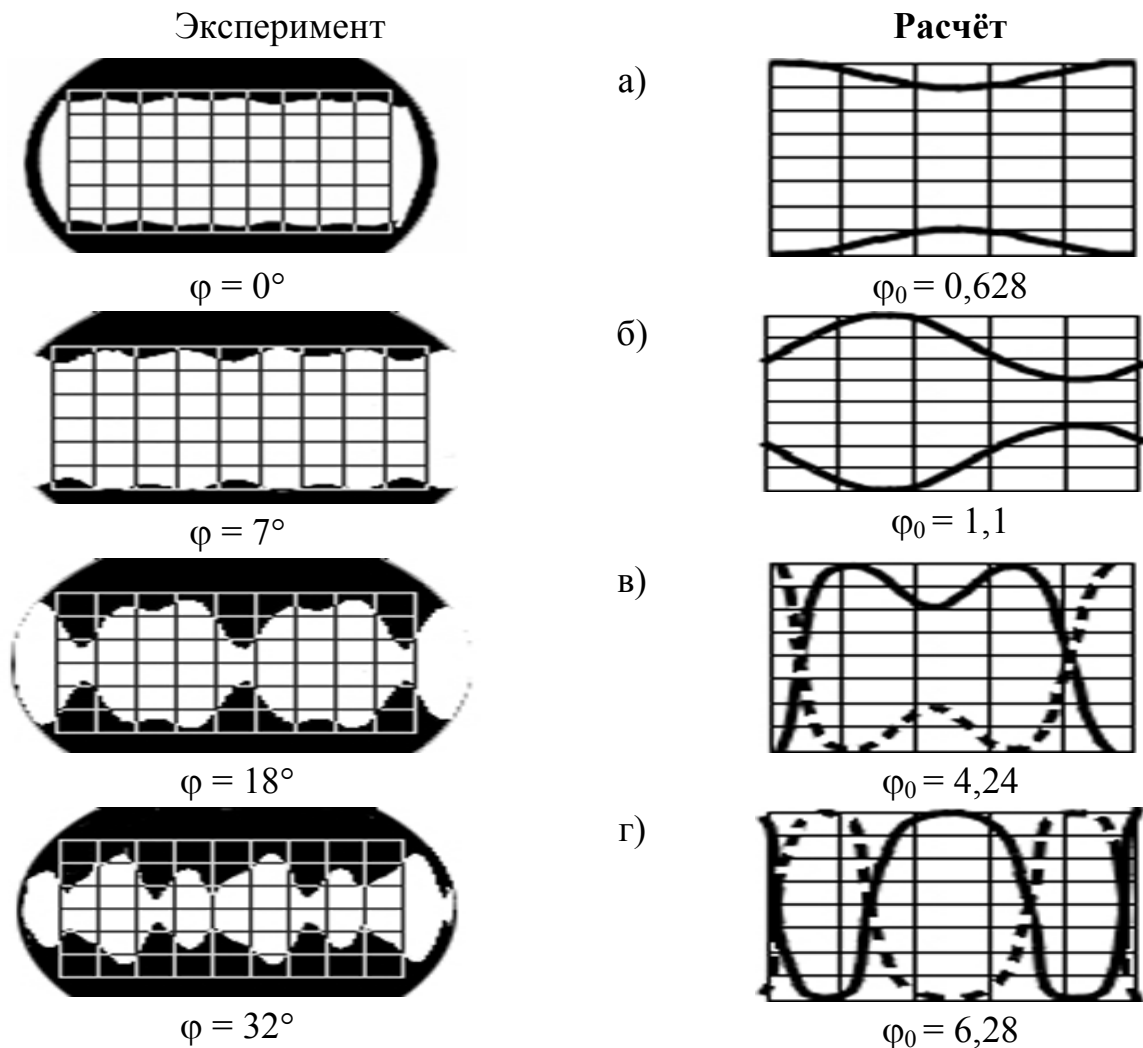


Рисунок 1 — Иллюстрация качественной проверки результатов анализа выходных сигналов модели

При сопоставлении огибающих, полученных экспериментальным и расчетным путем, заметно, что они характеризуют один и тот же механизм функционирования и преобразования входных сигналов в выходные. Отличие огибающих проявляется в том, что амплитудные значения расчётных кривых постоянны при увеличении  $\varphi_0$ , а у экспериментальных кривых наблюдается уменьшение амплитуды. Это связано с

тем, что не учитывалось изменение добротности КК с увеличением  $\varphi_0$  и влияние динамических параметров КК на выходные сигналы.

#### **Выводы:**

1. Аналитическое описание внутреннего механизма функционирования модели подтверждается экспериментально.

2. Предложенный подход обеспечивает естественный, плавный переход из непрерывной области в дискретную.

3. Полученные результаты открывают перспективу реализации модели не только аппаратными, но и программными средствами, что позволяет значительно упростить реализацию модели.

#### *Литература*

1. Веницкий А.С. Модулированные фильтры и следящий прием ЧМ сигналов. — М.: Сов. радио, 1969. — 548с.
2. Пищулина Е.В., Цыганаш В.Е. Критериальная оценка качества управления электрическим режимом печи электрошлакового переплава//Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научн. трудов. — Донецк: ДонГТУ, 2000. — Вып 13. — С.85–89.
3. Цыганаш В.Е. Метод моделирования электрического режима индукционной электротермической установки // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії: Зб. наук пр. Краматорськ — Слов'янськ, 2000. — с.316–317.
4. Калинин В.И., Герштейн Г.М. Введение в радиофизику. — М.: Госиздат техн. и теор. литературы, 1957. — 660 с.
5. Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д. Элементы прикладной математики. — М.: Изд-во “Наука”, 1972. — 592с.
6. Цыганаш В.Е. Определение огибающей на выходе узкополосного модулированного фильтра. // Изв. Вузов МВ и ССО СССР. Радиоэлектроника, 1984. — т.27, №11. —С.89–91.

Сдано в редакцию: 11.03.2003г.

Рекомендовано к печати: д.т.н., проф. Зори А.А.