

УДК 519.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ В СРЕДЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ MATLAB

Рыболовлев Д.А., к.т.н., научный сотрудник Академии ФСО России, г. Орел, e-mail: dmitrij-rybolovlev@yandex.ru;
Рыболовлев А.А., к.т.н., доцент Академии ФСО России, г. Орел, e-mail: rybolovlev@rambler.ru.

IMPULSE RESPONSE SIMULATION IN MATLAB

Rybolovlev D.A., Rybolovlev A.A.

The communication system via electricity cable is investigated as a linear stationary system. The specifics of impulse response determining is discussed. MATLAB script performing the calculation of the required values is given.

Key words: impulse response, frequency characteristic, transmission parameters, cable line.

Ключевые слова: импульсная характеристика, частотная характеристика, вторичные параметры передачи, кабельная линия.

Введение

При исследовании систем передачи информации одним из основных вопросов является определение закона связи входных и выходных сигналов. Формализовать решение задачи о прохождении детерминированного сигнала через рассматриваемую систему во временной области позволяет знание импульсной или переходной характеристик [1].

Настоящая статья посвящена рассмотрению практических вопросов определения импульсной характеристики (ИХ) системы в среде технических расчетов MATLAB. В качестве исследуемой системы выбран непрерывный канал связи, образованный проводниками кабеля типа ТП. Предлагаемый подход позволяет определить значения ИХ без необходимости проведения каких-либо испытаний на практике – на основании частотных характеристик (ЧХ) вторичных параметров передачи выбранного типа кабеля, указанных в справочниках.

В работе приводится исходный код скрипта MATLAB для расчета искомых значений и построения графика вычисленной импульсной характеристики. Рассмотрение систем передачи информации ограничивается классом линейных стационарных систем.

Общие положения

В работе для вычисления импульсной характеристики используется спектральный подход: искомые значения вычисляются путем выполнения обратного преобразования Фурье частотной характеристики кабельной линии, рассчитанной на основании табличных значений частотных характеристик вторичных параметров передачи выбранного типа кабеля [2, 3].

Вычисления производятся в следующей последовательности. Первоначально определяется ЧХ волнового сопротивления линии по формуле:

$$Z(f) = |Z(f)| e^{-j\varphi(f)}, \quad (1)$$

Рассмотрены особенности вычисления импульсной характеристики линейной стационарной системы – непрерывного канала связи, физически образованного проводниками кабельной линии. Приведен исходный код скрипта MATLAB, выполняющего расчёт искомых значений.

где $|Z(f)|$ – модуль ЧХ волнового сопротивления линии; $\varphi(f)$ – аргумент ЧХ волнового сопротивления линии; f – частота.

Умножением погонных параметров на заданную длину линии l вычисляется собственная ЧХ линии в комплексной форме:

$$W_0(f) = 10^{-\alpha(f)\frac{l}{20}} e^{-i\beta(f)l},$$

где $\alpha(f)$ – ЧХ коэффициента затухания линии; $\beta(f)$ – ЧХ коэффициента фазы линии.

Для определения рабочей ЧХ в комплексной форме учитывается влияние подключения к линии неидеально согласованных передатчика и приемника [2, 4]:

$$W(f) = \frac{4W_0(f)Z(f)r_2}{(r_1 + Z(f))(r_2 + Z(f))}, \quad (3)$$

где r_1 – внутреннее сопротивление передатчика; r_2 – входное сопротивление приемника.

Выполнением обратного преобразования Фурье [5] рассчитывается импульсная характеристика линии:

$$h(t) = 2 \operatorname{Re} \left(\int_0^{\infty} W(f) e^{j2\pi ft} df \right), \quad (4)$$

где $\operatorname{Re}\{f(z)\}$ – действительная часть функции комплексного переменного $f(z)$.

Пример вычисления импульсной характеристики

Пример подготовлен в среде технических расчетов MATLAB R2012a.

Рассматривается кабель типа ТП (кабель телефонный с полиэтиленовой изоляцией) с жилами диаметром 0,5 мм и сплошной полиэтиленовой изоляцией. Длина линии 1000 м.

Предполагается, что исследуемая кабельная линия удовлетворяет традиционным требованиям [6].



На основании табличных значений вторичные параметры передачи для удобства проведения расчетов представляются в виде кусочно-линейных функций частоты за счет применения линейной интерполяции. Поскольку значения частот, для которых приводятся табличные значения соответствующих параметров, совпадают, для многократного использования целесообразно выделить соответствующую функцию *Interpolate* в исходном коде:

```
% Реализация линейной интерполяции функции
% result - возвращаемое значение функции на
частоте f (f в килогерцах)
% array - массив значений функции на таблич-
ных частотах
function result = Interpolate(f, array)
% Массив значений частот в килогерцах
freqs = [0, 0.8, 3, 5, 10, 20, 50, 100, 150,
200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900,
1000, 1200, 1500, 2000, 2500, 10000];
% Индексы первой и последней узловых точек
first_index = 1;
last_index = size(freqs, 2);

% Частота f в области определения?
% Если нет, вернуть граничное значение
if (f <= freqs(first_index))
result = array(first_index);
end
if (f >= freqs(last_index))
result = array(last_index);
end
% Если да, рассчитать значение функции
if (f >freqs(first_index) && f
<freqs(last_index))
for i = (first_index + 1) : last_index
if ( (f >freqs(i-1)) && (f <= freqs(i)) )
result = array(i-1) + (f -
freqs(i-1)) * (array(i) - array(i-1)) /
(freqs(i) - freqs(i-1));
end
end
end
end
```

С использованием функции *Interpolate* задаются следующие функции, возвращающие на основании [6] значения вторичных параметров передачи выбранного типа кабеля в зависимости от частоты:

– функция *Get_Impedance_Mod* для определения модуля ЧХ волнового сопротивления:

```
% Определение модуля ЧХ волнового сопротив-
ления
% result - возвращаемое значение на частоте
f (f в килогерцах)
function result = Get_Impedance_Mod(f_kHz)
% Модуль волнового сопротивления в Ом,
массив табличных значений
Z_Ohm = [9999, 1109, 573, 444, 314.8, 225.2,
152.6, 125.7, 118.3, 115.4, 113.7, 112.8,
111.4, 110.5, 109.7, 109.1, 108.6, 108.1,
107.7, 107.2, 106.3, 105.6, 104.8, 102];
result = Interpolate(f_kHz, Z_Ohm);
end
```

– функция *Get_Impedance_Arg* для определения ар-

гумента ЧХ волнового сопротивления:

```
% Определение аргумента ЧХ волнового сопро-
тивления
% result - возвращаемое значение на частоте
f (f в килогерцах)
function result = Get_Impedance_Arg(f_kHz)
% Аргумент волнового сопротивления в граду-
сах, массив табличных значений
P_deg = [90, 44.5, 43.9, 43.2, 41.4, 38, 29,
19.5, 14.5, 12, 10, 9, 7.5, 6.6, 6.05, 5.57,
5.2, 4.9, 4.7, 4.3, 3.8, 3.35, 3, 2.5];
% Пересчет результата в радианы
result = Interpolate(f_kHz, P_deg) / 180 *
pi;
end
```

– функция *Get_Attenuation* для определения коэф-фициента затухания:

```
% Определение коэффициента затухания линии
% result - возвращаемое значение на частоте
f (f в килогерцах)
function result = Get_Attenuation(f_kHz)
% Коэффициент затухания в децибелах на 1 км,
массив табличных значений
Attenuation_dBpkm = [0, 1.54, 2.92, 3.73,
5.12, 6.81, 9.12, 10.3, 11.1, 11.6, 12.2,
12.9, 14.2, 15.6, 16.9, 18.2, 19.4, 20.3,
21.7, 23.6, 25.4, 30, 33.4, 84.4];
result = Interpolate(f_kHz, Attenua-
tion_dBpkm);
end
```

– функция *Get_Phase* для определения коэффициента фазы:

```
% Определение коэффициента фазы
% result - возвращаемое значение на частоте
f (f в килогерцах)
function result = Get_Phase(f_kHz)
% Коэффициент фазы в радианах на 1 км, мас-
сив табличных значений
B_radpkm = [0, 0.178, 0.349, 0.458, 0.668,
1, 1.88, 3.35, 4.85, 6.38, 7.9, 9.44, 12.5,
15.5, 18.5, 21.5, 24.4, 27.4, 30.3, 36.2,
45, 59.5, 74, 291.5];
result = Interpolate(f_kHz, B_radpkm);
end
```

Приведенная выше последовательность расчетов в соответствии с выражениями (1), (2) и (3) реализована в функции *Get_Freq_Char*, выполняющей расчет частотной характеристики на основании вторичных параметров передачи:

```
% Расчет частотной характеристики на основа-
нии вторичных параметров передачи
% result - возвращаемый массив значений ЧХ
на частотах от 0 до f_max_kHz с шагом df_kHz
% f_max_kHz - верхняя частота ЧХ в килогер-
цах
% df_kHz - частота дискретизации ЧХ в кило-
герцах
% len_km - длина линии в километрах
function result = Get_Freq_Char(f_max_kHz,
df_kHz, len_km)
% Индекс очередного значения
```

```

k = 1;
% Значение частоты очередного значения
f_kHz = 0;
while (f_kHz < f_max_kHz)
% ЧХ волнового сопротивления
Z = Get_Impedance_Mod(f_kHz) * exp(-
j * Get_Impedance_Arg(f_kHz));
r1_Ohm = 100;
r2_Ohm = 100;
% Собственная ЧХ
W0 = 10 ^ (Get_Attenuation(f_kHz) * (-len_km
/ 1000) * (1 / 20));
W0 = W0 * exp(-j * Get_Phase(f_kHz)
* (len_km / 1000));
% Рабочая ЧХ
W = (4 * W0 * r2_Ohm * Z) / ((r1_Ohm
+ Z) * (r2_Ohm + Z));
% Заполнение массива
WW(k) = W;
k = k + 1;
f_kHz = f_kHz + df_kHz;
end
result = WW;
end

```

Построение графиков амплитудно-частотной (АЧХ) $|W(f)|$ и фазочастотной (ФЧХ) $\arg(W(f))$ характеристик линии выполняется функцией `Plot_Freq_Char`:

```

% Построение графиков АЧХ и ФЧХ
function Plot_Freq_Char(freq_char, df_kHz)
% Вывод нескольких графиков в одном окне
subplot(3, 3, 1); % Первый график - АЧХ
plot(1 : length(freq_char), 10 *
log10(abs(freq_char))); % АЧХ, в дБ
% Явное указание шрифта позволяет избежать
проблем с отображением
% кириллических символов в подписях
set(gca, 'FontName', 'TimesNewRomanCyr',
'FontSize', 12);
grid on;
xlabel('f, кГц');
ylabel('|W(f)|, дБ');

subplot(3, 3, 2); % Второй график - ФЧХ
% Вывод первых 5000 значений - для наглядности
plot(1 : 5000, angle(freq_char(1 : 5000)));
% ФЧХ, в радианах
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman
Cyr');
grid on;
xlabel('f, кГц');
ylabel('arg|W(f)|, рад');
set(gca, 'YTick', [-3.14 -1.57 0 1.57
3.14]);
end

```

Примеры построения АЧХ и ФЧХ приведены на рис. 1 и рис. 2, соответственно.

Далее выполнением обратного преобразования Фурье (функция `ifft`, `inverseFastFourierTransform`) частотной характеристики рассчитывается импульсная характеристика. Функция `Get_Pulse_Char` реализует указанный расчет согласно выражению (4), а также выполняет построение графика ИХ:

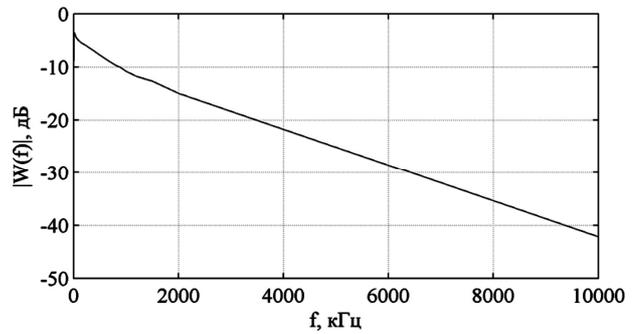


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика линии

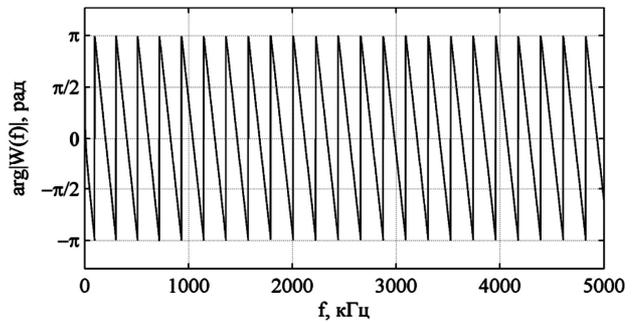


Рис. 2. Фазочастотная характеристика линии

```

% Расчет импульсной характеристики
function result = Get_Pulse_Char(f_max_kHz,
df_kHz, freq_char)
h = 2 * real(ifft(freq_char));

% Интервал дискретизации ИХ
dT = 1 / (2 * f_max_kHz * 1000);
% Построение графика на ИХ в интервале вре-
мени от 0 до 15 мкс
% Определение количества точек, которые вхо-
дят в интервал
count = 15e-6 / dT;
x = 1 : count;

% Продолжение вывода нескольких графиков в
одном окне
subplot(3, 3, 3); % Третий график - ИХ
plot(1 : count, h(1 : count));
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman Cyr');
grid on;
xlabel('t, 10^{-6} с');
ylabel('h(t), 1/c');

% Шаг сетки по горизонтали 1 мкс
XTickStep = floor(1e-6 / dT); % В 1 мкс вхо-
дит 1/dT отсчетов
% Формирование подписей оси абсцисс
XTickLabels = {'0'};
for L = XTickStep : XTickStep : count + 1
Label = [num2str(L * dT * 1e6, 3)
''];
XTickLabels = cat(1, XTickLabels, Label);
end
set(gca, 'XTick', [0 : XTickStep :
count], 'XTickLabel', XTickLabels, 'Xlim', [0
count]);
result = h;
end

```



Пример графика рассчитанной импульсной характеристики линии представлен на рис. 3.

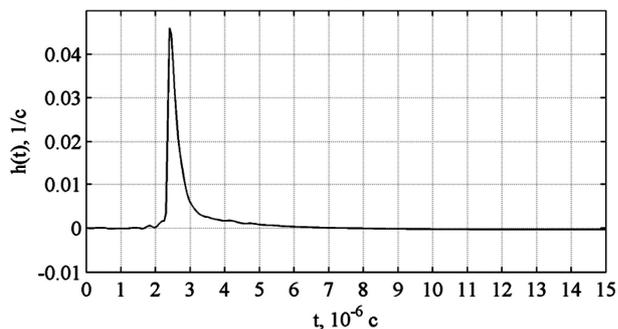


Рис. 3. Импульсная характеристика линии

Для запуска скрипта и последовательного построения в одном окне графиков, представленных на рис. 1 и рис. 3, целесообразно дополнить исходный код «стартовой» функцией:

```
function result = Start()
f_max_kHz = 10000; % Верхняя частота ЧХ в
килогерцах
df_kHz = 1; % Частота дискретизации ЧХ в ки-
логерцах
len_km = 1000; % Длина линии

% Расчет ЧХ
freq_char = Get_Freq_Char(f_max_kHz, df_kHz,
len_km);
% Построение графиков АЧХ и ФЧХ
Plot_Freq_Char(freq_char, df_kHz);
% Расчет и построение графика ИХ
pulse_char = Get_Pulse_Char(f_max_kHz,
df_kHz, freq_char);
end
```

Приведенный исходный код скрипта позволяет рассчитать значения импульсной характеристики кабельной линии на основании табличных значений модуля и аргумента ЧХ волнового сопротивления линии, коэффициента затухания и коэффициента фазы и построить графики АЧХ, ФЧХ и ИХ.

Заключение

Знание импульсной характеристики формализует решение любой задачи о прохождении детерминированного сигнала через исследуемую линейную стационарную систему – сигнал на выходе есть свертка входного сигнала и импульсной характеристики. Указанный подход применим и при рассмотрении систем передачи информации для решения задачи определения сигнала на выходе непрерывного канала связи, физически образованного кабельной линией.

В работе подробно рассмотрен пример определения импульсной характеристики системы в среде технических расчетов MATLAB. В качестве исследуемой системы выбран непрерывный канал связи, образованный проводниками кабеля типа ТП.

Преимущество и удобство предлагаемого подхода состоит в том, что значения импульсной характеристики вычисляются на основании табличных значений частотных характеристик вторичных параметров передачи

выбранного типа кабеля, без необходимости проведения каких-либо практических испытаний.

С другой стороны, к рассчитанным значениям следует относиться с известной степенью доверия – представленные результаты являются идеализированными. В реальных условиях кабельные линии неизбежно подвержены внешним воздействиям, что приводит к различным повреждениям, вызывающим, в том числе, изменения параметров передачи. Такие изменения, в свою очередь, обуславливают различия в реальных и идеальных характеристиках кабельных линий.

Кроме того, следует помнить о том, что импульсная характеристика, так же как и порождающая ее дельта-функция, есть результат разумной идеализации. С физической точки зрения импульсная характеристика лишь приближенно отображает реакцию исследуемой системы на входной импульсный сигнал произвольной формы с единичной площадью при условии, что длительность этого сигнала пренебрежимо мала по сравнению с временным масштабом системы [1].

В статье не рассматриваются вопросы взаимных влияний, что обусловлено несколькими причинами. Во-первых, анализ подобных явлений потребовал бы значительного усложнения материала и более строгого математического описания, что не соотносится с основной целью работы – продемонстрировать возможности практического подхода к исследованию систем передачи информации в среде MATLAB. Во-вторых, учет взаимных влияний возможен и в рамках рассматриваемого подхода путем введения дополнительных импульсных характеристик, по сути описывающих передачу переходных помех. Детальное описание такого решения приведено в работе [7].

Литература

1. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы : учеб. / С.И. Баскаков. – М.: Высш. шк., 1983. – 536 с.
2. Кочеров, А.В. Разработка методов измерений характеристик кабелей связи при внедрении и эксплуатации сетей широкополосного доступа: дис. канд. тех. наук : 05.12.13: защищена 6.11.08 / Кочеров Андрей Владимирович. – Москва, 2008. – 245 с. – Библиогр.: с. 166–177.
3. Брискер, А.С. Городские телефонные кабели: справочник / А.С. Брискер, А.Д. Руга, Д.Л. Шарле. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1984. – 304 с.
4. Кочанов, Н.С. Линейные радиотехнические устройства / Кочанов Н.С., Кузьменко М.И., Куприянов В. А. – М.: Воениздат, 1974. – 448 с.
5. Залманзон, Л. А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях / Л. А. Залманзон. – М.: Наука, 1989. – 496 с.
6. ОСТ 45.36-97. Линии кабельные, воздушные и смешанные городских телефонных сетей. Нормы электрические эксплуатационные. – Введ. 1998.01.01. – М.: ЦНТИ «Информсвязь», 1997. – 43 с. – (Стандарт отрасли).
7. Рыболовлев, Д. А. Математическая модель системы передачи информации, учитывающая взаимное влияние электропроводных линий связи / Д. А. Рыболовлев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2. – С. 126–135.