

ПРОБЛЕМЫ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ([1], разд. 3; [2])

Результаты, полученные в процессе проведения экспериментов, требуется обработать с целью получения дополнительной информации об исследуемой системе. Процедуры обработки экспериментальных данных можно условно подразделить на этапы первичной и вторичной обработки, совокупность алгоритмов которых предполагает осуществление предварительного преобразования полученных данных и применение основных алгоритмов обработки соответственно. Проблемы вторичной обработки будут рассмотрены в последующих разделах применительно к результатам натуральных экспериментов и результатам статистического моделирования СС.

Ниже кратко излагаются вопросы первичной обработки данных, необходимость в которой возникает при проведении натуральных или компьютерных экспериментов для подавления помех, выделения полезных сигналов и проч. Поскольку абстрактное описание процедур первичной обработки представляется малоинформативным, рассмотрим их на примере реального эксперимента, сущность которого была описана в разд. 2. Рассматриваемая ниже задача относится к типовым задачам первичной обработки, и ее основа может быть использована в качестве прообраза научно-исследовательской работы студентов при изучении дисциплин с подобной тематикой.

Данный эксперимент проводился в целях изучения свойств системы регулирования частоты (числа оборотов вала) дизель-генератора при вариациях нагрузки. В эксперименте фиксировались: параметры исходного установившегося режима, величина ступенчатого изменения нагрузки, сигналы датчика числа оборотов вала.

Датчик имел зубчатое колесо, закрепленное на валу и электромагнит, ток которого в процессе вращения имел характер гармонических колебаний с частотой, пропорциональной числу зубцов колеса. Фрагмент таких колебаний представлен на рис. 3.1. Одному обороту

вала соответствует число периодов таких колебаний, равное числу зубцов датчика.

Точному определению числа периодов выходного сигнала датчика мешает наличие случайных помех, хорошо заметное на рис. 3.1. Поэтому, для определения точек пересечения гармонической функции (см. рис. 3.1) с осью абсцисс применим регрессионный анализ.

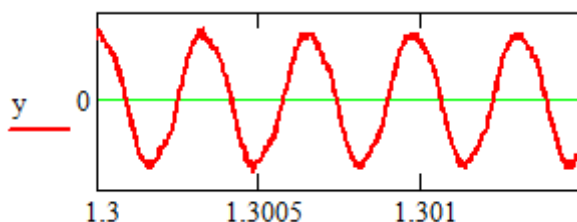


Рис. 3.1. Выходной сигнал датчика числа оборотов

Учитывая практически линейный характер гармонического процесса в малой окрестности вокруг каждой точки пересечения, для выделения полезной информации из измеренных данных можно использовать процедуру построения простой линейной регрессии.

Прототип программы, позволяющей решать задачи рассмотренного типа, составим в среде Mathcad. Процедура первичной обработки для описываемого случая предполагает: выделение информативной части массивов результирующих данных; определение точек пересечения гармоническим процессом (см. рис. 3.1) оси абсцисс путем построения простой линейной регрессии; определение периодов колебаний и пересчет их в числа оборотов вала; построение переходного процесса, возникающего в результате изменения нагрузки и его фильтрация. Кратко проиллюстрируем эти этапы.

Определение периодов высокочастотного колебания. На этом этапе определяются точки пересечения гармонического процесса с осью абсцисс. Разработанная циклическая процедура последовательно фиксирует моменты смены знаков процесса (см. рис. 3.1), выделяет для каждого из них координаты нескольких точек до и после перехода и строит простую линейную регрессию по этим точкам. Ре-

зультат для каждого момента времени, в который происходит пересечение, вычисляется по уравнению регрессионной прямой.

На рис. 3.2, *a* представлен фрагмент mcd-файла, иллюстрирующий определение точки пересечения (точки Z). Регрессия строится по четырем точкам, ординаты которых содержатся в первом столбце матрицы z , а соответствующие абсциссы — в третьем столбце той же матрицы. Два последних столбца матрицы z — матрица A системы четырех линейных алгебраических уравнений. Два параметра (объединенные вектором r) уравнения линии регрессии вычисляются алгоритмом метода наименьших квадратов (выделен заливкой в рамке). Отношение этих параметров дают точку пересечения Z линии регрессии с осью абсцисс.

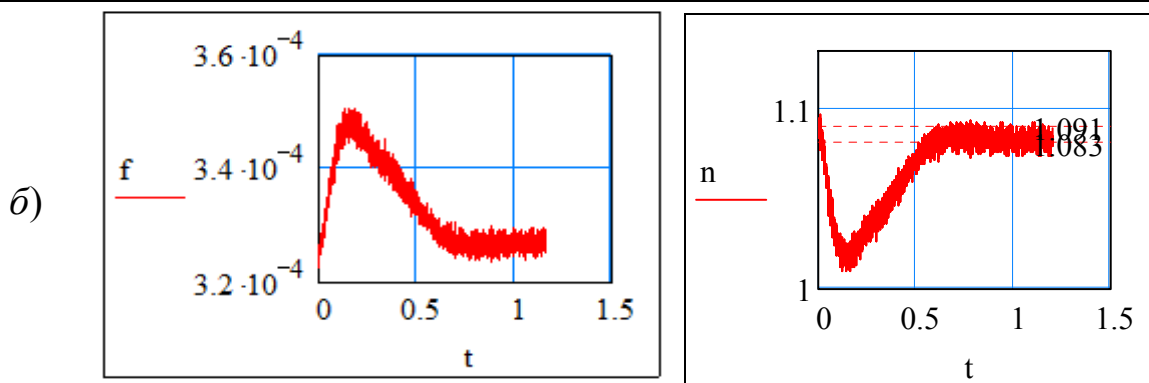
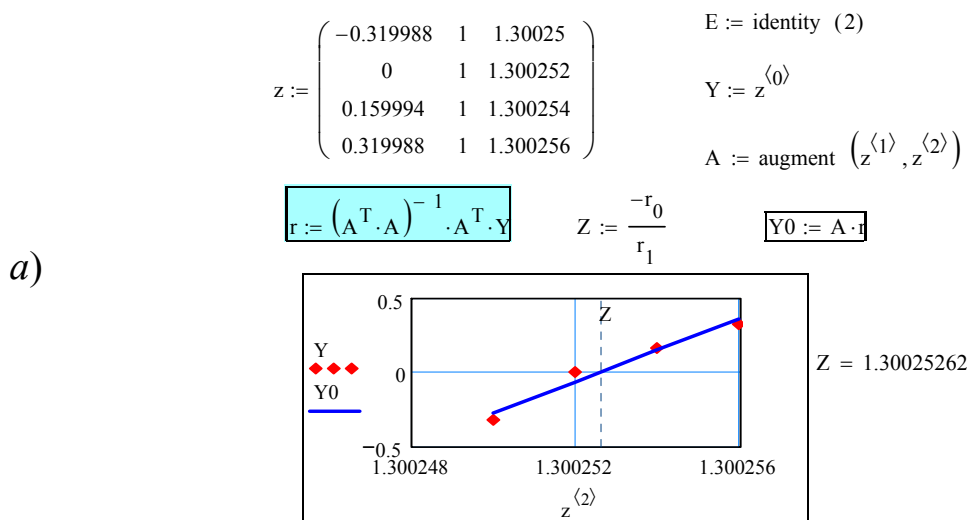


Рис. 3.2. Пример определения точки Z (*a*) и результаты обработки (*б*)
 Рассмотренная процедура использована для получения периодов

колебаний процесса (см. рис. 3.1) в переходном режиме, после вариации нагрузки. На рис. 3.2, б представлены графики изменения периодов выходного сигнала датчика (левый график) и соответствующих значений числа оборотов вала $n(t)$ при набросе нагрузки (справа, в относительных единицах). На правом графике маркерами указаны начальный и установившийся уровни экспериментального процесса изменения числа оборотов вала, которые свидетельствуют о наличии статизма у используемой в объекте системы регулирования.

Фильтрация полученного процесса $n(t)$. Наличие помех в процессе (см. рис. 3.2, справа) снижает достоверность информации. Для снижения уровня помех может быть использовано несколько подходов, среди которых: фильтрация с использованием классических фильтров Баттерворта, Бесселя, Чебышева [4]; фильтрация на основе простых фильтров первого и второго порядков; искусственное преобразование (коррекция) спектра.

Синтез классических фильтров характеризуются достаточно высокой сложностью ввиду большого числа определяемых параметров. Анализ показал, что применительно к рассматриваемым задачам первичной обработки экспериментальных данных влияние помех может быть успешно парировано применением последних двух подходов, более простых в практическом применении. При этом синтез фильтров первого и второго порядков может быть проведен в рамках экстремальной задачи, решаемой в среде одной из СКМ, а при коррекции спектра потребуются лишь применение прямого и обратного преобразования Фурье. Кратко прокомментируем эти два подхода с иллюстрацией их качества применительно к полученному процессу $n(t)$.

Из графика процесса $n(t)$ (см. рис. 3.2, правый график) следует, что выделяемый полезный сигнал имеет низкочастотный характер; а помеха — высокочастотная. На рис. 3.3 приведены результаты прямого (слева) и обратного (справа) Фурье-преобразования процесса $n(t)$.

Левый график (спектр процесса) позволяет разделить диапазоны частот полезного сигнала (низкочастотная составляющая процесса) и

помех (высокочастотные составляющие). Так, правая граница низкочастотной составляющей составляет $f_0 \approx 1$ гц; левую границу высокочастотных помех можно оценить значением $f_1 \approx 50$ гц. Эти границы будут учтены при настройке фильтров и коррекции спектра.

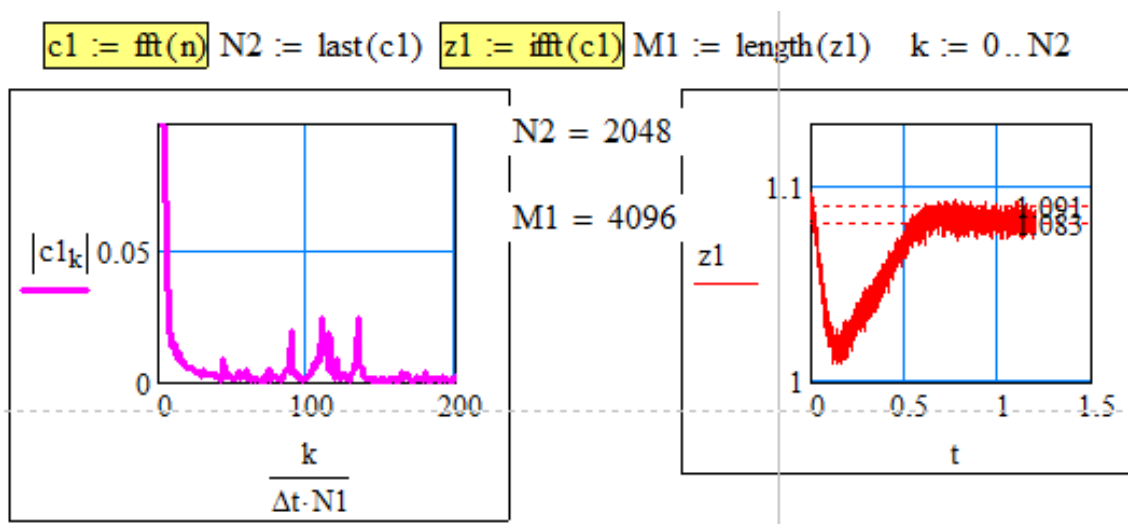


Рис. 3.3. Спектр процесса $n(t)$ и восстановленный процесс

Определение параметров фильтров. Рассмотрим простейшие фильтры первого и второго порядков с передаточными функциями

$$W_1(p) = 1/(Tp + 1); W_2(p) = 1/(T^2 p^2 + 2T\zeta p + 1). \quad (3.1)$$

Определение параметров этих фильтров требует решения экстремальной задачи. Опишем один из вариантов такой задачи для рассматриваемого процесса. Для каждого из фильтров (3.1) могут быть построены амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ). Обозначая АЧХ как $M(r, \omega)$, в качестве минимизируемой функции выберем АЧХ на левой границе высокочастотной области спектра, т. е. $M(r, \omega_1)$, причем $r = T$ для $W_1(p)$; $r = \mathbf{r} = |T, \zeta|^T$ для $W_2(p)$; $\omega_1 = 2\pi f_1 = 314$. В низкочастотном диапазоне фильтр практически не должен искажать полезный сигнал по амплитуде и обеспечивать допустимый сдвиг по фазе. Поэтому ограничениями в данной

задаче могут служить, например, требования $M(r, \omega_0) > 0,99$; $F(r, \omega_0) > -0,06$. Здесь $\omega_0 = 2\pi f_0 = 6,28$; $F(r, \omega)$ — ФЧХ. Выбранный порог для ФЧХ соответствует сдвигу фазы 3,438 град или, для частоты $f_0 = 1$ гц — запаздыванию полезного сигнала на выходе фильтра, равному 0,00956 с, что представляется допустимым.

Следует отметить, что при определении параметров фильтров второго порядка дополнительно к указанным ограничениям полезно добавлять ограничения, сформированные модулями вещественной или мнимой частей полюсов $W_2(p)$:

$$\lambda_{1,2} = -(T/\zeta) \pm \sqrt{\zeta^2 - 1/T}; \quad T > 0, \quad 0 < \zeta \leq 1.$$

Так, значение модуля мнимой части $b = \sqrt{1-\zeta^2}/T$ может служить приближенной оценкой резонансной частоты этого фильтра, значение которой следует сдвигать вправо для обеспечения требования $M(r, \omega_0) \cong 1$. В этих условиях были найдены параметры фильтров, по передаточным функциям (3.1) сформированы дифференциальные уравнения и, путем решения задачи Коши, были получены выходные сигналы $s(t)$ фильтров при входном сигнале $n(t)$. Иллюстрации выполненных процедур занимают значительное место, поэтому ниже проводится лишь краткое их описание без подробностей.

На рис. 3.4 приведены основные части фрагментов mcd-файлов с решением экстремальных задач поиска параметров фильтра первого (рис. 3.4, а) и второго (рис. 3.4, б) порядков с применением встроенной функции minimize.

Найденные значения параметров: $T \cong 0,00957$ для фильтра первого порядка $W_1(p)$ в (3.1); $T \cong 0,00691$, $\zeta \cong 0,691$ для фильтра $W_2(p)$. В нижней части каждого из двух фрагментов (см. рис. 3.4) приведены значения АЧХ для граничных частот (1 гц и 50 гц) и ФЧХ (в градусах) на частоте 1гц.

a) $T := 0.001$ $\omega_0 := 6.28$ $\omega_1 := 314$ $V(T) := M(T, \omega_1)$
 Given $T > 0$ $F(T, \omega_0) > -0.06$ $M(T, \omega_0) > 0.99$
 $T_0 := \text{Minimize}(V, T)$ $T_0 = 9.566 \times 10^{-3}$

$M(T_0, \omega_0) = 0.998$ $M(T_0, \omega_1) = 0.31589$ $F(T_0, \omega_0) = -3.438 \text{ deg}$

b) $V(r) := M(r, 314)$ $\omega_0 := 6.28$
 $r := (0.1 \ 0.7)^T$ Given
 $\frac{r_1}{r_0} > 100$ $F(r, \omega_0) > -0.06$ $r_0 > 0$ $r_1 > 0$
 $r_0 := \text{Minimize}(V, r)$ $r_0 = \begin{pmatrix} 0.0069092 \\ 0.6909242 \end{pmatrix}$

$M(r_0, \omega_0) = 1$ $M(r_0, 314) = 0.20976$ $F(r_0, \omega_0) = -3.438 \text{ deg}$

Рис. 3.4. Определение параметров фильтров

Из приведенных данных следует, что фильтр $W_2(p)$, по сравнению с фильтром первого порядка, обеспечивает более сильное подавление помех в высокочастотной области, оставляя при этом процесс в низкочастотном диапазоне ($f \leq 1$ гц) без амплитудных искажений.

Вид АЧХ фильтров (3.1) с найденными параметрами, подтверждающий отмеченное качество, приведен на рис. 3.5, а; левый и правый графики относятся к $W_1(p)$ и $W_2(p)$ соответственно. На рис. 3.5, б приведены результаты моделирования — прохождения исходного процесса $n(t)$ (обозначен n на графиках) через фильтры $W_1(p)$ и $W_2(p)$ (слева и справа соответственно). Выходной сигнал $s(t)$ каждого фильтра обозначен на графиках через s . Графики выходов фильтров (см. рис. 3.5, б) визуально практически неразличимы. Для сопоставительного анализа вариантов необходимы количественные характеристики, однако при этом нельзя использовать обычные статистические оценки в виде остаточной суммы квадратов или остаточной дисперсии, поскольку они будут искажаться сдвигом процесса по фазе.

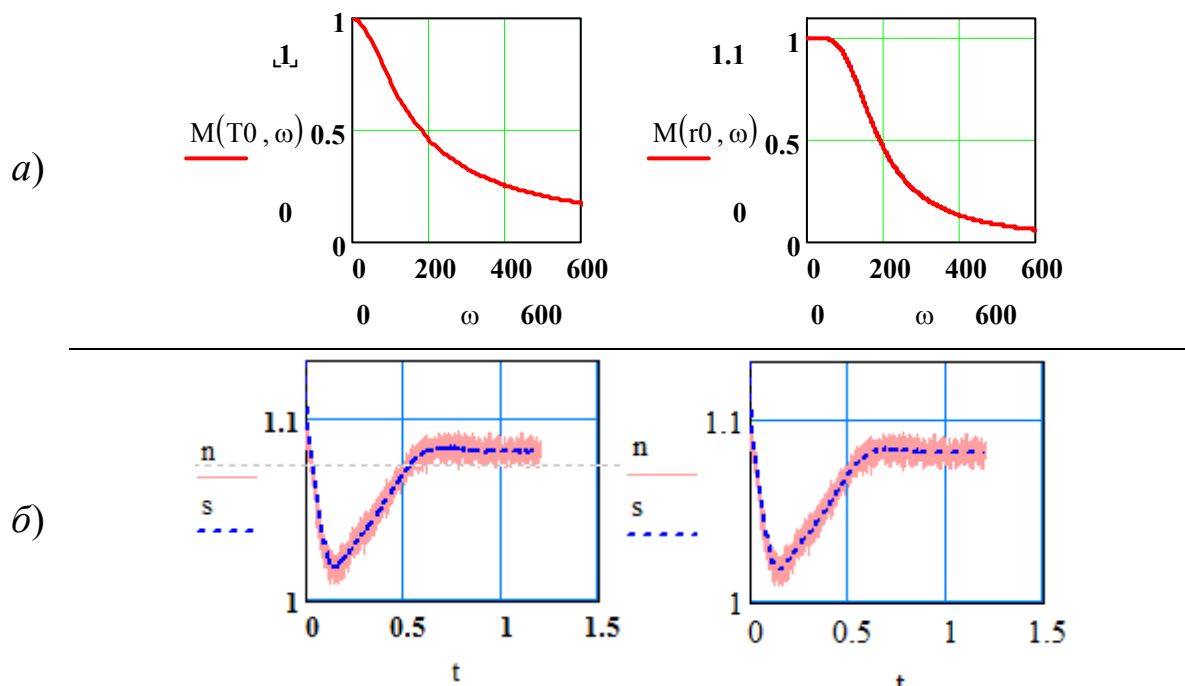


Рис. 3.5. АЧХ (а) и результаты моделирования (б) фильтров (3.1)

Для оценки качества фильтрации используем простой критерий δ_B в виде выборочного среднего для вектора $\delta_j = [n(t_j) - s(t_j)]$, $j = 0, \dots, 4095$. При расчетах получено: $\delta_B = -4,24 \cdot 10^{-4}$ для фильтра $W_1(p)$; $\delta_B = -4,04 \cdot 10^{-4}$ для фильтра $W_2(p)$, что свидетельствует о некотором преимуществе фильтра второго порядка, обеспечивающего фильтрацию сигнала $n(t)$ без амплитудных искажений.

Коррекция спектра. Еще одна возможность подавления помех в результатах первичной обработки исследуемого сигнала связана с искусственным обнулением высокочастотного диапазона его спектра, полученного Фурье-преобразованием. Этот способ, строго говоря, нельзя отнести к фильтрации, поскольку он не связан с пропусканием исследуемого процесса через какой-либо физически реализуемый фильтр. Однако он опирается на некую процедуру обработки сигнала, в результате которой может быть выделен полезный сигнал.

При обсуждении спектра процесса $n(t)$ (см. рис. 3.3, слева), была выделена высокочастотная его часть, левой границей которой можно считать $f_1 \approx 50$ гц. Образует скорректированный спектр

рассматриваемого процесса, обнуляя в векторе, образованном Фурье-преобразованием процесса $n(t)$ элементы, соответствующие $f \geq f_1$.

Обозначая полученный таким путем вектор через $\mathbf{c1}$, осуществим для него обратное Фурье-преобразование и получив в результате процесс без высокочастотных составляющих (вектор $\mathbf{z1}$). Рис. 3.6 представляет копию mcd-файла с описанной процедурой коррекции спектра и содержит результаты такого преобразования.

Результирующий процесс, как и ранее, представлен на фоне исходного $n(t)$. Значение критерия качества, использованного в предыдущих случаях, для этого способа составляет $\delta_B = 0$, что свидетельствует о практическом отсутствии искажений полезного сигнала и позволяет считать этот способ перспективным для решения круга описанных задач.

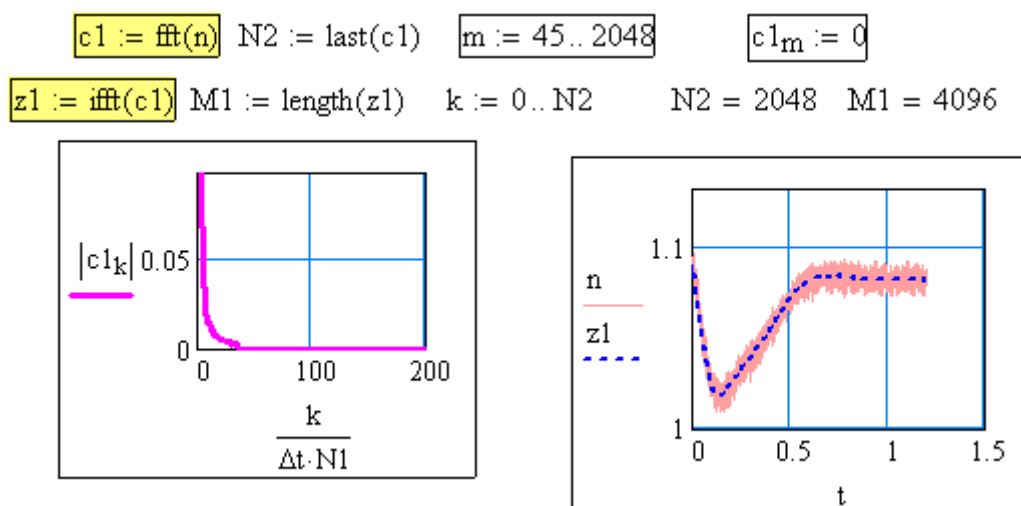


Рис. 3.6. Коррекция спектра и результат восстановления процесса

Анализ данных рассмотренного эксперимента системы позволил выявить ряд типовых задач первичной обработки и применить процедуры первичной обработки данных, которые имеют достаточно широкую область практического использования, включающую задачи обработки как натуральных, так и компьютерных экспериментов. Эти процедуры могут с успехом применяться и при статистическом моделировании систем со случайными воздействиями, поскольку случайные факторы искажают выходные переменные аналогично влиянию помех.

Источники:

1. Ивановский Р.И. Статистическое моделирование. Учебное пособие. Изд – во СПбПУ, 2011, 257 с.
2. Ивановский Р.И. Обработка экспериментальных данных энергетических объектов как начальный этап их моделирования /НТВ СПбГПУ/ 2 (97), 2010, С. 106 – 112.