

Моделирование частотных сканов

Богачёв А.М.

12 октября 2022 г.

Аннотация

В отчёте приведены результаты исследований...

Содержание

1	Введение	3
2	Математические модели частотных сканов	5
2.1	Модель сигнала релаксации ёмкости	5
2.2	Модель идеального частотного скана	6
2.3	Модель, учитывающая нелинейность и неэкспоненциальность	7
2.4	Модель многоэкспоненциального частотного скана	8
3	Реализация моделей	9
3.1	Интерфейс и функционал	9
3.2	Алгоритм идентификации параметров моделей	11
3.3	Оценка качества модели	15
	Список литературы	17

1 Введение

Релаксационная спектроскопия глубоких уровней (РСГУ) – метод исследования электрически активных дефектов в полупроводниковых материалах. Данный метод обладает высокой чувствительностью к малым концентрациям ловушек носителей зарядов и является спектроскопическим. Существуют различные вариации РСГУ, например токовая и емкостная, так метод емкостной релаксационной спектроскопии глубоких уровней основан на исследовании процесса (сигнала) релаксации ёмкости барьерной структуры. Определив значения постоянной времени сигнала релаксации для разных температур образца, исследователь может определить энергию активации дефекта, вызывающего релаксацию.

В идеальном случае релаксация ёмкости носит экспоненциальный характер, однако так бывает не всегда. Согласно обзору [5] сигналы релаксации ёмкости барьерных структур можно условно разделить на три группы:

1. Моноэкспоненциальный сигнал релаксации, обусловленный одним единственным энергетическим уровнем в запрещённой зоне полупроводника.
2. Сигнал релаксации, состоящий из суммы нескольких моноэкспоненциальных сигналов релаксации.
3. Сигнал релаксации, характеризуемый непрерывным распределением скоростей эмиссии, представленным спектральной функцией $g(\lambda)$.

В последних двух случаях сигнал не является экспоненциальным.

Задача определения постоянной времени одной или нескольких экспоненциальных составляющих процесса релаксации ёмкости или спектральной функции $g(\lambda)$ относится к задачам экспоненциального анализа. Подходы к решению таких задач, а также фундаментальные ограничения и особенности сбора и обработки экспериментальных данных рассмотрены в исчерпывающем обзоре [5].

Во Владимирском Государственном университете создан измерительно-вычислительный комплекс релаксационной спектроскопии глубоких уровней, основным измерительным прибором которого служит спектрометр DLS-82E фирмы Semilab. Измерительно-вычислительный комплекс реализует метод емкостной РСГУ с частотным сканированием при постоянной температуре. В спектрометре аппаратно реализована корреляционная обработка сигнала релаксации с опорной функцией lock-in.

Технические решения, заложенные в названном измерительном оборудовании, требуют особых методов анализа полученных экспериментальных данных, в частности, разработки и идентификации моделей частотных сканов (экспериментальных данных, полученных на измерительно-вычислительном комплексе).

В следующих разделах отчёта будут рассмотрены модели частотных сканов, некоторые технические и методические вопросы их реализации и идентификации, а также их апробация на экспериментальных данных.

В современной учебной и технической литературе набирают популярность термины «машинное обучение» и «статистическое обучение» (например в книгах [3], [10], [4]). За ними, как правило, скрывается процесс создания моделей, которые после идентификации их параметров на некой тренировочной выборке (экспериментальных данных с известными целевыми значениями), способны с некоторой точностью определять целевые значения для новых, ранее не встречавшихся данных. Таким образом, регрессия и классификация являются одними из самых распространенных задач машинного обучения [3]. В данном отчёте термин «машинное обучение» будет использоваться именно для обозначения процесса разработки и идентификации моделей, решения задачи регрессии.

2 Математические модели частотных сканов

В данном разделе представлены описания математических моделей сигнала релаксации ёмкости и моделей частотного скана.

2.1 Модель сигнала релаксации ёмкости

Согласно обзору [5], зависимость значения ёмкости от времени $f(t)$ для моноэкспоненциального сигнала релаксации имеет вид выражения 1.

$$f(t) = A \exp(-\lambda t), \quad (1)$$

где

A – амплитуда сигнала релаксации ёмкости;

λ – скорость экспоненциального спада, обратнопропорциональная постоянной времени сигнала релаксации τ (выражение 2).

$$\lambda = \tau^{-1} \quad (2)$$

Спектр моноэкспоненциального сигнала релаксации имеет вид, представленный на рисунке 1.

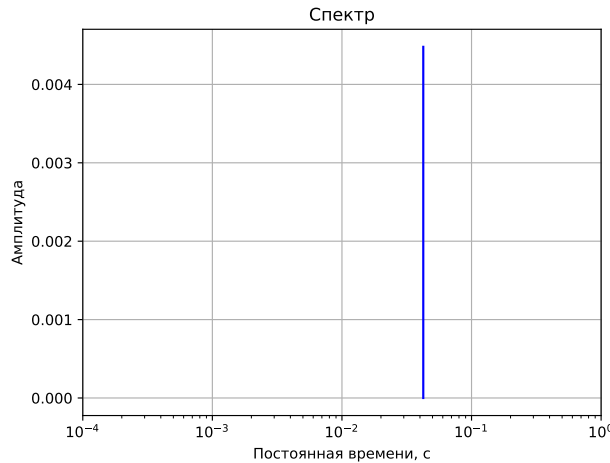


Рис. 1: Пример спектра моноэкспоненциального сигнала релаксации ёмкости. На графике амплитуда указана в пФ.

Согласно источнику [5], зависимость сигнала релаксации ёмкости от времени $f(t)$ для сигнала, образованного несколькими дискретными экспоненциальными сигналами, определяется выражением 3.

$$f(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp(-\lambda_i t), \quad (3)$$

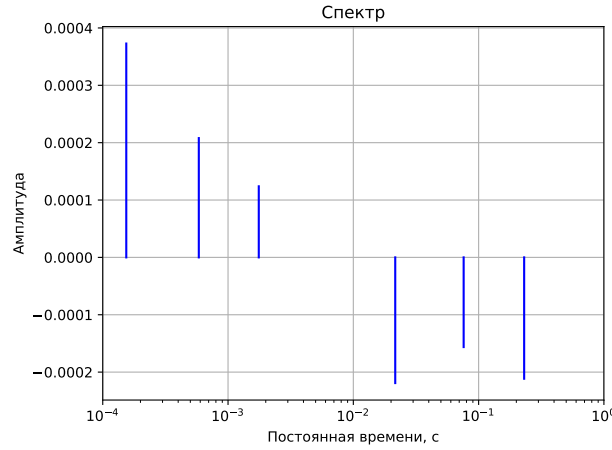


Рис. 2: Пример спектра сигнала релаксации ёмкости, содержащего несколько экспоненциальных составляющих. На графике амплитуда указана в пФ.

где n – количество экспоненциальных составляющих в спектре. Пример спектра такого сигнала показан на рисунке 2.

На спектрах амплитуды могут быть отрицательными. В данном случае знак при амплитуде указывает лишь на направление изменения ёмкости [6].

2.2 Модель идеального частотного скана

Предполагается, что в идеальном случае сигнал релаксации ёмкости содержит одну экспоненциальную составляющую, а измерительный тракт спектрометра линеен. В таком случае модель частотного скана описывает аппаратные преобразования спектрометра DLS-82E учитывая только форму его опорной функции.

В спектрометре DLS-82E реализована корреляционная обработка сигнала релаксации ёмкости, таким образом сигнал на выходе аналогового тракта спектрометра определяется выражением 4, согласно публикации [5].

$$S[g(\lambda), t_c, t_d] = \frac{1}{t_c} \int_{t_d}^{t_d+t_c} f(t) W(t - t_d) dt, \quad (4)$$

где

$W(t)$ – весовая функция, определённая на интервале времени $[0, t_c]$,

t_c – период (длительность) весовой функции $W(t)$,

t_d – время задержки между началом сигнала релаксации и началом корреляционной обработки. Согласно обзору [5], время задержки t_d , обычно, вводится для улучшения избирательности или для снижения искажения сигнала из-за перегрузки измерительной системы.

$g(\lambda)$ – распределение скоростей экспоненциальных спадов, составляющих релаксационный сигнал.

Модель аппаратных преобразований (корреляционной обработки), учитывающая форму весовой функции, реализованной в спектрометре DLS-82E, для моноэкспоненциального сигнала определяется выражением 5 [6].

$$S(\tau, C_A, F_0, t_1) = C_A K_{BS} K_{LS} \phi(\tau, F_0, t_1), \quad (5)$$

где

C_A – амплитуда емкостного релаксационного сигнала,

K_{BS} – масштабный коэффициент, зависящий от чувствительности емкостного моста,

K_{LS} – масштабный коэффициент селектора,

τ – постоянная времени релаксации глубокого уровня,

F_0 – частота сканирования импульсов заполнения,

t_1 – длительность импульса заполнения,

$\phi(\tau, F_0, t_1)$ – функция определяемая выражением 6.

$$\phi(\tau, F_0, t_1) = M \tau F_0 e^{-\frac{0.05}{\tau F_0}} \left(1 - e^{\frac{t_1 F_0 - 0.45}{\tau F_0}} - e^{-\frac{0.5}{\tau F_0}} + e^{\frac{t_1 F_0 - 0.95}{\tau F_0}} \right), \quad (6)$$

где M – масштабный множитель.

Масштабный множитель M определяется выражением 7.

$$M(\tau, F_0, t_1) = \frac{1}{\max \left[\tau F_0 e^{-\frac{0.05}{\tau F_0}} \left(1 - e^{\frac{t_1 F_0 - 0.45}{\tau F_0}} - e^{-\frac{0.5}{\tau F_0}} + e^{\frac{t_1 F_0 - 0.95}{\tau F_0}} \right) \right]} \quad (7)$$

Введём коэффициент A (выражение 8), характеризующий амплитуду сигнала релаксации ёмкости и перепишем выражение 5 с учётом того, что длительность импульса заполнения t_1 является неизменной величиной, и получим выражение 9.

$$A = C_A K_{BS} K_{LS}. \quad (8)$$

$$S(\tau, A, F_0) = A \phi(\tau, F_0) \quad (9)$$

2.3 Модель, учитывающая нелинейность и неэкспоненциальность

Для одновременного учёта нелинейности аппаратного тракта и неэкспоненциальности сигнала релаксации, связанной с присутствием нескольких

экспоненциальных составляющих в модель вводят коэффициент нелинейности-неэкспоненциальности p [6], после чего выражение 9 приобретает вид выражения 10.

$$S(\tau, A, F_0, p) = A [\phi(\tau, F_0)]^p. \quad (10)$$

В случае моноэкспоненциального сигнала релаксации и линейного измерительного тракта коэффициент $p = 1$, в остальных случаях он отклоняется от 1. Данный коэффициент эмпирический и не имеет физического смысла. Он комплексно учитывает нелинейность и неэкспоненциальность, что позволяет повысить точность моделирования, но он не позволяет дать ответ на вопрос какой именно из этих двух факторов имел место.

2.4 Модель многоэкспоненциального частотного скана

Если предположить, что сигнал релаксации ёмкости состоит из нескольких экспоненциальных составляющих и определяется выражением 3, то опираясь на выражения 3, 4, 6 и 9, можно сделать вывод, что частотный скан, созданный таким сигналом релаксации ёмкости определяется выражением 11.

$$Y = \sum_{i=1}^n A_i \phi(\tau_i, F_0), \quad (11)$$

где n – количество экспоненциальных составляющих в сигнале релаксации. Данная модель предполагает, что измерительный такт линейен, а сигнал релаксации создан ловушками носителей заряда, дающими линейчатый спектр, аналогичный спектру, представленному на рисунке 2.

3 Реализация моделей

В данном разделе приводится краткое описание программной реализации моделей, примеры рассчитанных частотных сканов, примеры результатов идентификации их моделей, рассматриваются некоторые методические вопросы.

3.1 Интерфейс и функционал

Модели оформлены в виде пакета модулей на языке программирования Python 3. Интерфейс моделей совместим с одной из самых популярных библиотек для машинного обучения `scikit-learn` [7]. Такое техническое решение позволяет использовать имеющиеся в библиотеке инструменты preprocessing данных, оценки качества и оптимизации параметров моделей, а также интегрировать модели в другие программные обеспечения и конвейеры обработки данных.

Разработанные модели (выражения 9, 10, 11), выполняют две функции:

1. Вычисление частотного скана с заданными параметрами.
2. Идентификация параметров модели частотного скана по экспериментальным данным.

Идентификация параметров моделей реализована методом градиентного спуска. Имеется возможность вывода значений параметров модели на каждой итерации. Реализована автоматическая остановка идентификации при достижении заданного модуля разницы между значениями функции потерь на текущей и предыдущей итерации.

Модели реализуют единообразный интерфейс. При инициализации каждая модель получает длительность импульса заполнения (параметр `filling_pulse`), которая считается неизменной при измерениях) и параметры алгоритма идентификации. Параметры алгоритма идентификации варьируются:

- модель идеального частотного скана и модель частотного скана с показателем нелинейности-неэкспоненциальности (выражения 9, 10):

`fit_p_coef` – если параметр принимает значение `True` (логическую единицу), тогда при идентификации параметров модели определяется показатель нелинейности-неэкспоненциальности p , иначе (`False` – логический ноль) p считается равным 1 и не изменяется при идентификации параметров модели;

`learning_rate` – скорость градиентного спуска;

`n_iters` – максимальное количество итераций при идентификации;

stop_val – модуль разницы между значениями функции потерь на текущей и предыдущей итерации, при достижении которого происходит остановка идентификации;

verbose – если параметр принимает значение True, то в стандартный поток вывода печатаются значения параметров модели на каждой итерации.

- модель многоэкспоненциального частотного скана (выражение 11):

n_exps – количество экспоненциальных составляющих в сигнале релаксации (значение n в выражении 11);

learning_rate – скорость градиентного спуска;

n_iters – максимальное количество итераций при идентификации;

stop_val – модуль разницы между значениями функции потерь на текущей и предыдущей итерации, при достижении которого происходит остановка идентификации;

verbose – если параметр принимает значение True, то в стандартный поток вывода печатаются значения параметров модели на каждой итерации.

При идентификации параметров модели идеального частотного скана определяется амплитуда и десятичный логарифм постоянной времени ($\log_{10}(\tau)$) сигнала релаксации. Причины замены постоянной времени её десятичным логарифмом объясняются в следующем разделе.

При идентификации модели с показателем нелинейности-неэкспоненциальности к амплитуде и десятичному логарифму постоянной времени сигнала релаксации добавляется значение показателя нелинейности-неэкспоненциальности p .

При идентификации многоэкспоненциальной модели определяется n пар амплитуда — десятичный логарифм постоянной времени сигнала релаксации. По паре для каждой из n экспоненциальных составляющих.

Параметры модели частотного скана могут быть не только идентифицированы, но и заданы пользователем.

Чтобы выполнить идентификацию параметров модели, нужно передать ей набор экспериментальных (тренировочных) данных, состоящих из вектора значений десятичных логарифмов частоты опорной функции ($\log_{10}(F_0)$) и соответствующего вектора значений сигнала DLTS – сигнала на выходе аппаратного тракта спектрометра DLS-82E. При идентификации параметров модели по умолчанию их начальные параметры выбираются случайным образом, однако могут быть и определены пользователем.

При идентификации модели значения её параметров на каждой итерации сохраняются в атрибуте `fit_results_`, что позволяет пользователю получить и проанализировать данные о работе алгоритма идентификации.

При вычислении частотного скана с заданными параметрами модели передаётся вектор значений десятичных логарифмов частоты опорной функции, для каждого из которых модель вычислит значение сигнала DLTS.

3.2 Алгоритм идентификации параметров моделей

Идентификация параметров модели производится методом градиентного спуска, при этом минимизируется среднеквадратическая ошибка между значениями, полученными в результате измерений, и результатами моделирования (выражение 12).

$$E = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - y_i^*)^2, \quad (12)$$

где

y_i – значения, полученные в результате измерений,

y_i^* – значения, полученные в результате моделирования,

m – количество измерений.

При каждом обновлении постоянной времени сигнала релаксации (как при идентификации модели, на каждой итерации, так и при обновлении постоянной времени пользователем) вычисляется масштабный множитель $M(\tau, F_0, t_1)$, определяемый выражением 7. Таким образом модель всякий раз вычисляет значение $\max \left[\tau F_0 e^{-\frac{0.05}{\tau F_0}} \left(1 - e^{\frac{t_1 F_0 - 0.45}{\tau F_0}} - e^{-\frac{0.5}{\tau F_0}} + e^{\frac{t_1 F_0 - 0.95}{\tau F_0}} \right) \right]$. В текущей реализации моделей данный максимум вычисляется приблизительно с помощью градиентного спуска. Не смотря на то, что применяемый итеративный алгоритм находит максимум очень быстро, эти вычисления занимают довольно много времени при идентификации моделей, потому что выполняются на каждой итерации (при каждом обновлений постоянной времени τ). В случае многоэкспоненциальной модели данный процесс повторяется еще и для каждой экспоненциальной составляющей, что заметно снижает скорость идентификации модели при значениях параметра `n_exps` больше 10. Таким образом в будущем вычисления можно будет оптимизировать за счёт одного из следующих решений:

1. найти точное аналитическое выражение для расчёта $M(\tau, F_0, t_1)$,
2. найти для $M(\tau, F_0, t_1)$ аппроксимирующую функцию, позволяющую вычислять масштабный множитель с приемлимой точностью.

В моделях градиентный спуск реализован при помощи библиотеки TensorFlow [8], главное преимущество которой в том, что она реализует алгоритм автоматического дифференцирования на графе вычислений. Таким образом,

при расчёте градиентов сначала производные берутся символично (точно), а затем вычисляются их значения, поэтому точность вычисления градиента ограничена только разрядностью чисел [3], [10], [8].

Во всех моделях используется алгоритм идентификации с постоянной и одинаковой для всех параметров скоростью градиентного спуска, поэтому для ускорения идентификации параметров моделей и улучшения сходимости алгоритма необходима нормализация (приведение к единому масштабу) тренировочных данных.

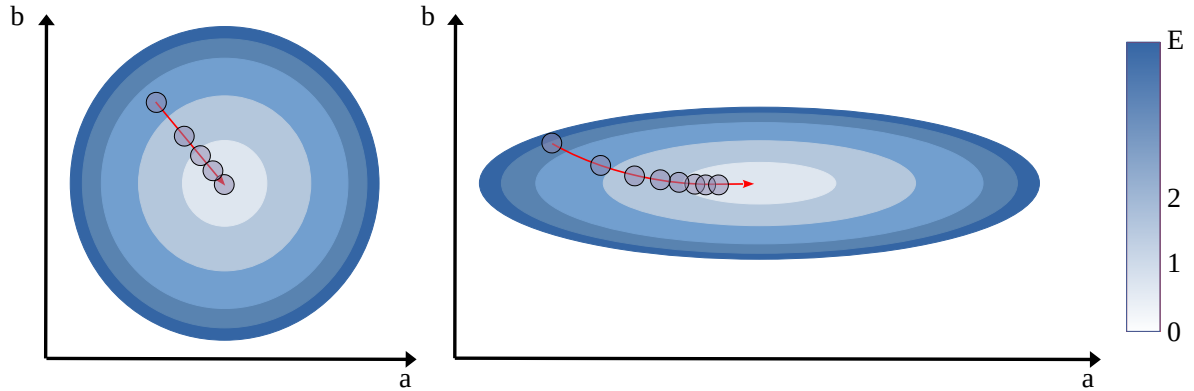


Рис. 3: Градиентный спуск с нормализацией тренировочных данных (график слева) и без неё (график справа) для модели с двумя параметрами. a и b – параметры модели, E – функция потерь.

Рассмотрим примеры на рисунке 3. В идеальном случае функция потерь (среднеквадратическая ошибка – выражение 12) должна иметь форму «симметричной чаши», а изменение обоих параметров должно вносить одинаковый вклад в значение градиента. В таком случае алгоритм градиентного спуска достигнет минимума функции потерь кратчайшим путём, как на левом графике рисунка 3. Если же тренировочные данные имеют очень разные масштабы, функция потерь (график справа на рисунке 3) будет иметь форму «вытянутой чаши», а алгоритм идентификации будет долго подстраивать одни из параметров без существенного изменения функции потерь [3]. Чтобы минимизировать этот эффект, тренировочные данные нормализуют перед идентификацией параметров модели. После идентификации параметры модели и тренировочные данные можно вернуть в исходный масштаб.

Для разработанных моделей тренировочные данные имеют существенно отличающиеся масштабы: значение сигнала DLTS находятся в диапазоне долей пикофард, а диапазон изменения частоты опорной функции спектрометра покрывает три декады (от 1 Гц до 2500 кГц). Таким образом, желательно выполнять нормализацию исходных данных перед идентификацией параметров модели. Кроме этого, изменение параметров модели (постоянной времени и амплитуды) вносят существенно различающийся

вклад в градиент функции потерь. Если снова обратиться к выражениям 6 и 9, можно заметить, что значение функции потерь пропорционально первой степени амплитуды A сигнала релаксации и экспоненте, возведенной в степень скорости экспоненциального спада, то есть $e^{\frac{1}{\tau}}$. Поэтому на вход моделей при идентификации подаётся десятичный логарифм частотной функции ($\log_{10}(F_0)$), а идентификация производится не по постоянной времени τ , а по десятичному логарифму постоянной времени $\log_{10}(\tau)$. На рисунке 4 показан пример идентификации идеального частотного скана. «Путь» параметров модели в процессе идентификации показывает красная линия с маркерами, а изолинии и градиент – значения функции потерь.

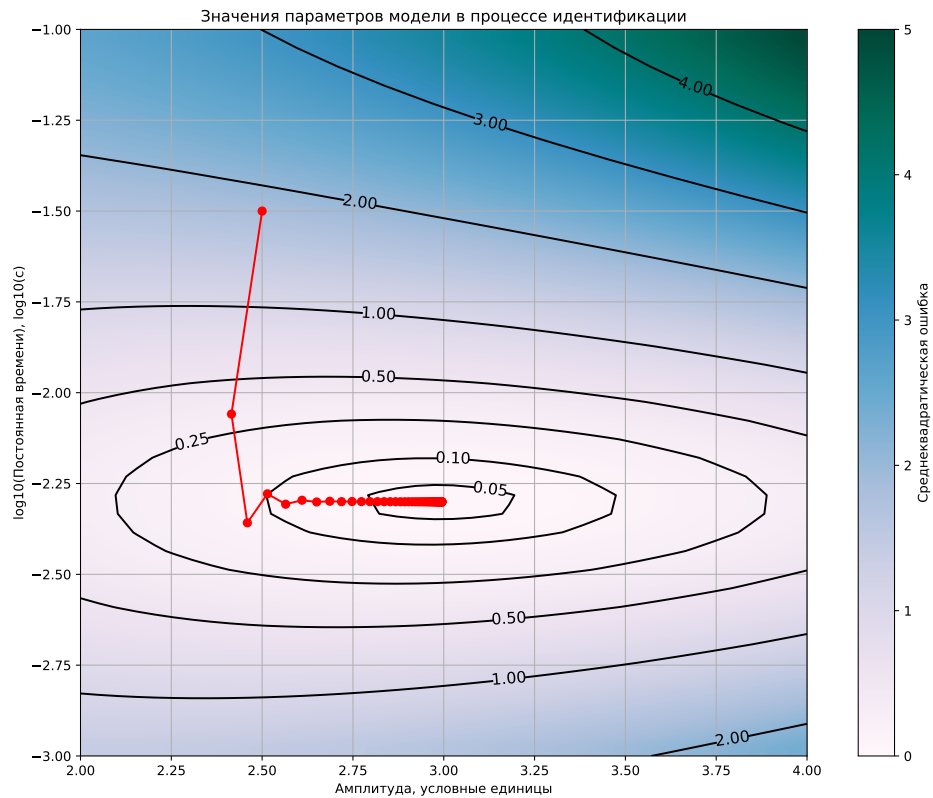


Рис. 4: «Путь» значений параметров при идентификации.

На рисунке 4 форма изолиний отличается от концентрических окружностей, а «путь» параметров не похож на прямую линию, что говорит о том, что возможна дальнейшая оптимизация алгоритма идентификации, однако, названные выше меры позволили значительно смягчить эффект от различных масштабов в экспериментальных данных и в параметрах модели. Также возможно использование одного из алгоритмов адаптивного градиентного спуска, то есть алгоритмов изменяющих скорость по мере приближения к оптимальным значениям параметров. Такое решение не изменит форму функции потерь, но оптимизирует «путь» и количество итераций.

Рисунки 5 и 6 показывают примеры результатов идентификации модели идеального частотного скана и модели многоэкспоненциального частотного

скана соответственно на рассчитанных тренировочных данных.

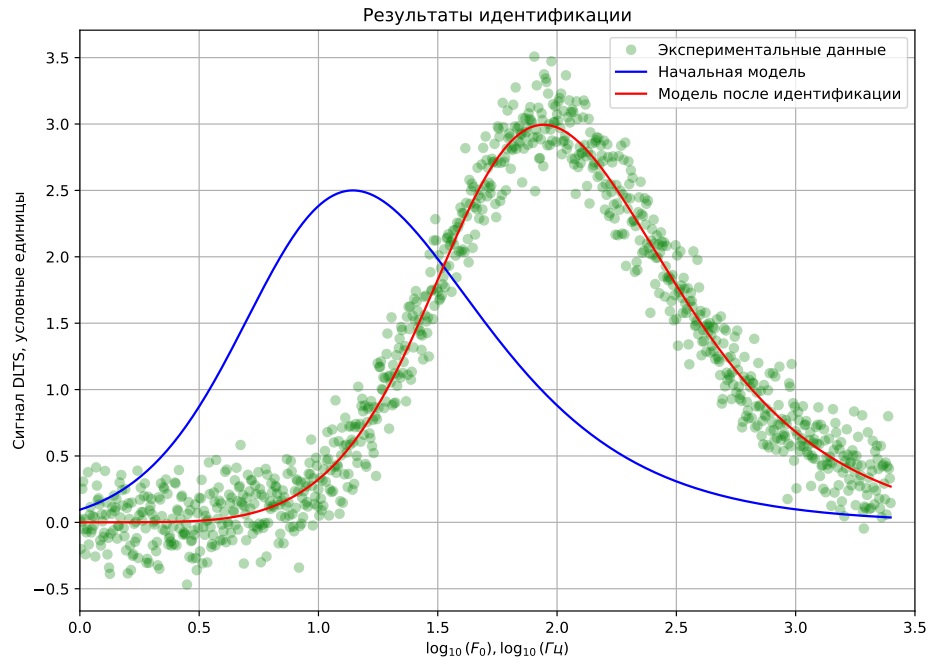


Рис. 5: Пример результата идентификации модели идеального частотного скана.

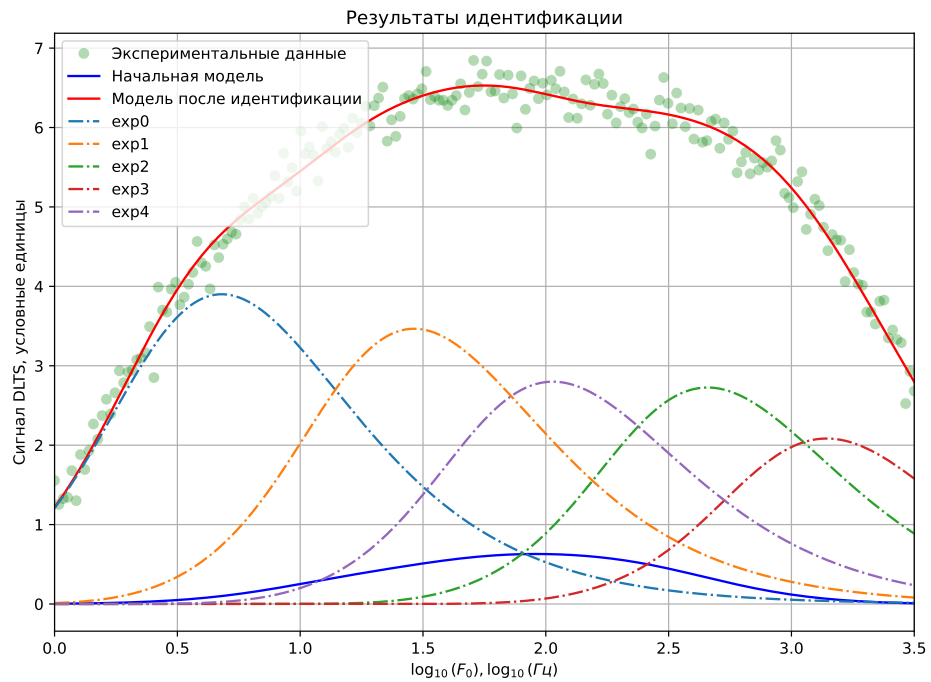


Рис. 6: Пример результата идентификации модели многоэкспоненциального частотного скана. Штрихпунктирными линиями показаны частотные сканы для отдельных экспоненциальных составляющих сигнала релаксации.

3.3 Оценка качества модели

Квартет Энскомба (рисунок 7) [9], [1].

Таблица 1: Статистические свойства наборов данных в Квартете Энскомба

Характеристика	Значение
Среднее значение переменной x	9.0
Дисперсия переменной x	10.0
Среднее значение переменной y	7.5
Дисперсия переменной y	3.75
Корреляция между переменными x и y	0.816
Прямая линейной регрессии	$y = 3 + 0.5x$
Коэффициент детерминации линейной регрессии (R^2)	0.67

Таблица 2: Значения корней из среднеквадратической ошибки

Набор данных	I	II	III	IV
Значение корня среднеквадратической ошибки (RMSE)	1.119	1.119	1.118	1.118

Таблица 3: Квартет Энскомба

I		II		III		IV	
x	y	x	y	x	y	x	y
10,0	8,04	10,0	9,14	10,0	7,46	8,0	6,58
8,0	6,95	8,0	8,14	8,0	6,77	8,0	5,76
13,0	7,58	13,0	8,74	13,0	12,74	8,0	7,71
9,0	8,81	9,0	8,77	9,0	7,11	8,0	8,84
11,0	8,33	11,0	9,26	11,0	7,81	8,0	8,47
14,0	9,96	14,0	8,10	14,0	8,84	8,0	7,04
6,0	7,24	6,0	6,13	6,0	6,08	8,0	5,25
4,0	4,26	4,0	3,10	4,0	5,39	19,0	12,50
12,0	10,84	12,0	9,13	12,0	8,15	8,0	5,56
7,0	4,82	7,0	7,26	7,0	6,42	8,0	7,91
5,0	5,68	5,0	4,74	5,0	5,73	8,0	6,89

Несколько слов о рабочем процессе при разработке моделей, оптимизации параметров алгоритма идентификации. Иллюстрации оверфитинга [3], [2].

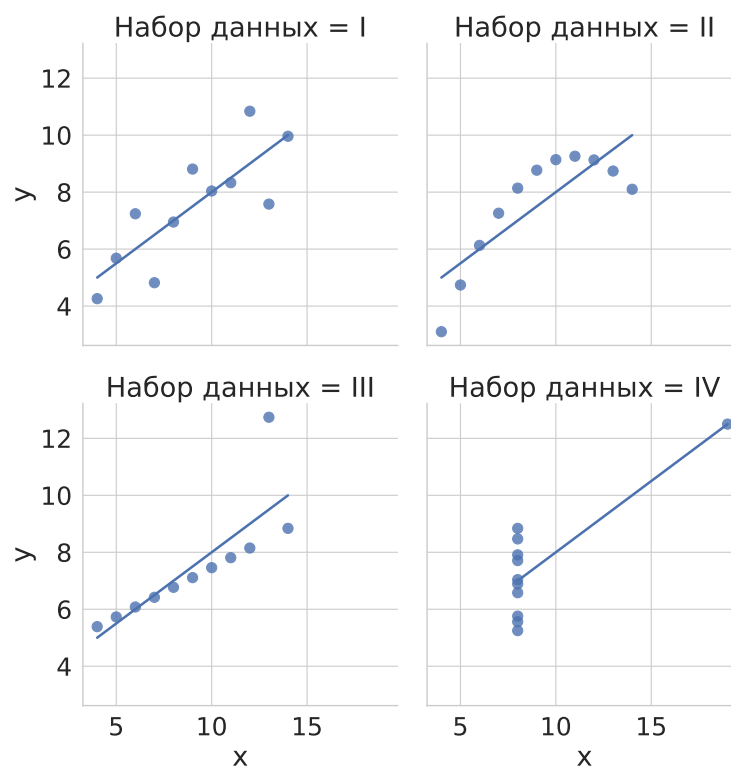


Рис. 7: Квартет Энскомба.

Список литературы

- [1] F. J. Anscombe. «Graphs in Statistical Analysis». В: *The American Statistician* 27.1 (1973), с. 17—21. ISSN: 00031305. DOI: [10.2307/2682899](https://doi.org/10.2307/2682899). URL: <http://www.jstor.org/stable/2682899> (дата обр. 11.10.2022).
- [2] *Cross-validation: evaluating estimator performance*. URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/cross_validation.html (дата обр. 12.10.2022).
- [3] Aurelien Geron. *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems*. 2nd. O'Reilly Media, Inc., 2019. ISBN: 1492032646.
- [4] Trevor Hastie, Robert Tibshirani и Jerome Friedman. *The Elements of Statistical Learning*. Springer Series in Statistics. Springer New York, NY, 2017. ISBN: 978-0-387-84858-7. DOI: [10.1007/978-0-387-84858-7](https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7).
- [5] Andrei A. Istratov и Oleg F. Vyvenko. «Exponential analysis in physical phenomena». В: *Review of Scientific Instruments* 70.2 (1999), с. 1233—1257. DOI: [10.1063/1.1149581](https://doi.org/10.1063/1.1149581). eprint: <https://doi.org/10.1063/1.1149581>. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1149581>.
- [6] Vladimir Krylov, Aleksey Bogachev и Т. Pronin. «Deep level relaxation spectroscopy and nondestructive testing of potential defects in the semiconductor electronic component base». В: *Radio industry (Russia)* 29 (май 2019), с. 35—44. DOI: [10.21778/2413-9599-2019-29-2-35-44](https://doi.org/10.21778/2413-9599-2019-29-2-35-44).
- [7] *scikit-learn: Machine Learning in Python*. URL: <https://scikit-learn.org/> (дата обр. 10.10.2022).
- [8] *TensorFlow*. URL: <https://www.tensorflow.org/> (дата обр. 10.10.2022).
- [9] *Квартет Энскомба*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Anscombe%27s_quartet (дата обр. 12.10.2022).
- [10] С. Николенко, А. Кадури и Е. Архангельская. *Глубокое обучение*. СПб.: Питер, 2018, с. 480. ISBN: 978-5-496-02536-2.