

УДК 538.956

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.61.10.009](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.61.10.009)

Разработка методики определения параметров полупроводниковых электронных компонентов

Р.В. Цветков, П.Ю. Ванина✉, М.Н. Мешалкина, В.А. Сушников

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Резюме. Разработана методика метрологически обоснованного определения электрических параметров полупроводниковых электронных компонентов – диодов, стабилитронов, биполярных и полевых транзисторов – на основе экспериментальных вольт-амперных характеристик (ВАХ). Для обработки данных применен регрессионный анализ с линеаризацией физических моделей: уравнение Шокли для диода, линейная модель для участка стабилизации стабилитрона и передаточной характеристики биполярного транзистора, квадратичная модель для полевого транзистора. Оценка адекватности моделей выполнена с использованием коэффициента детерминации, QQ-графиков и критерия Шапиро-Уилка, что позволило статистически подтвердить нормальность распределения остатков. Проведена количественная оценка суммарной неопределенности измеряемых параметров с разделением случайной (статистической) и инструментальной составляющих в соответствии с ГОСТ 34100.3-2017. Инструментальная погрешность оценивалась методом предельных согласованных отклонений, статистическая – на основе доверительных интервалов коэффициентов регрессии. Для объединения составляющих применено геометрическое суммирование с расчетом эффективного числа степеней свободы по формуле Уэлча-Саттертуэйта. Экспериментальная апробация на лабораторном стенде ЭЭ-ОЭ для выпрямительного диода 1N4007, стабилитрона 1N5338B, биполярного транзистора BD139-16 и полевого транзистора IRF740 показала, что во всех случаях доминирующий вклад в итоговую погрешность вносит статистическая составляющая, обусловленная отклонением реальных тепловых и физических процессов в кристаллах от идеализированных моделей, особенно в области больших токов. Полученные интервальные оценки параметров могут быть использованы для контроля качества и метрологического сопровождения полупроводниковых компонентов.

Ключевые слова: параметры полупроводниковых компонентов, вольт-амперная характеристика, регрессионный анализ, линеаризация моделей, адекватность регрессионной модели, неопределенность измерений, составляющие неопределенности.

Для цитирования: Цветков Р.В., Ванина П.Ю., Мешалкина М.Н., Сушников В.А. Разработка методики определения параметров полупроводниковых электронных компонентов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(10). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2512> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.61.10.009

Development of a methodology for determining the parameters of semiconductor electronic components

R.V. Tsvetkov, P.Yu. Vanina✉, M.N. Meshalkina, V.A. Sushnikov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, the Russian Federation

Abstract. A methodology for metrologically valid determination of the electrical parameters of semiconductor electronic components – diodes, zener diodes, bipolar and field-effect transistors – has been developed based on experimental current-voltage characteristics (IV characteristics). Regression analysis with linearization of physical models was used for data processing: the Shockley equation for a diode, a linear model for the zener diode stabilization section and the transfer characteristic of a bipolar

transistor, and a quadratic model for a field-effect transistor. Model adequacy was assessed using the coefficient of determination, QQ plots, and the Shapiro-Wilk test, which made it possible to statistically confirm the normality of the residual distribution. A quantitative assessment of the total uncertainty of the measured parameters was performed with separation of random (statistical) and instrumental components in accordance with GOST 34100.3-2017. Instrumental error was estimated using the method of maximum consistent deviations, and statistical error was estimated based on the confidence intervals of the regression coefficients. To combine the components, geometric summation was used, calculating the effective number of degrees of freedom using the Welch-Satterthwaite formula. Experimental testing on the EE-OE laboratory bench for a 1N4007 rectifier diode, a 1N5338B zener diode, a BD139-16 bipolar transistor, and an IRF740 field-effect transistor showed that in all cases, the dominant contribution to the final error is made by the statistical component, caused by the deviation of actual thermal and physical processes in crystals from idealized models, especially in the high-current region. The resulting interval parameter estimates can be used for quality control and metrological support of semiconductor components.

Keywords: semiconductor component parameters, current-voltage characteristic, regression analysis, model linearization, regression model adequacy, measurement uncertainty, uncertainty components.

For citation: Tsvetkov R.V., Vanina P.Yu., Meshalkina M.N., Sushnikov V.A. Development of a methodology for determining the parameters of semiconductor electronic components. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(10). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2512> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.61.10.009

Введение

Полупроводниковые диоды, стабилитроны и транзисторы остаются ключевой элементной базой современной электроники. По данным мировых аналитических отчетов, объем рынка дискретных полупроводников в 2025 году превысил 30 млрд долларов, что подтверждает их устойчивое значение для цепей преобразования, коммутации и стабилизации сигналов [1, 2].

В процессе производства и эксплуатации параметры компонентов подвержены разбросу из-за технологических факторов [3, 4], температурных эффектов и старения материалов [5]. Экспериментальное определение ВАХ и сопоставление с паспортными данными – важнейшая задача технического контроля. Однако существующие методы имеют недостатки. Классический метод двух точек не учитывает поведение характеристики во всем диапазоне и чувствителен к случайным погрешностям. Кроме того, отсутствует комплексный метрологический анализ: случайная и инструментальная составляющие погрешности часто рассматриваются отдельно, а адекватность моделей (уравнение Шокли, линейная аппроксимация) не проверяется статистически [6].

Наряду с классическими градиентными и регрессионными методами, в последние десятилетия активное развитие получили методы глобальной оптимизации, в частности, генетические и роевые алгоритмы. Генетические алгоритмы (ГА) и алгоритмы роевого интеллекта (PSO) успешно применяются для извлечения параметров моделей полупроводниковых приборов, демонстрируя способность находить глобальный оптимум и не требуя задания начальных условий [7, 8]. Однако эти методы, как правило, более ресурсоемки и не дают аналитических выражений для оценки неопределенности получаемых параметров, что ограничивает их применение в метрологических задачах.

Данная работа, очевидно, является актуальной и заключается в разработке методики, которая позволяет использовать всю совокупность экспериментальных данных для устойчивых оценок параметров, проверять нормальность распределения остатков (критерий Шапиро-Уилка, QQ-графики) и объединять случайную и инструментальную составляющие неопределенности для получения достоверных интервальных оценок [9]. Предлагаемый подход, основанный на регрессионном анализе

[10, 11] и правилах ГОСТ 34100.3-2017, обеспечивает метрологически обоснованное определение параметров, диодов [12, 13], стабилитронов [14, 15] и транзисторов [16, 17].

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- подбор параметров измерительных схем и снятие ВАХ на лабораторном стенде ЭЭ-ОЭ, предназначенном для исследования различных цифровых схем и их комбинаций;
- применение методов математической линеаризации физических моделей;
- обработка результатов методом наименьших квадратов (МНК) с последующей проверкой остатков на нормальность распределения;
- оценка суммарной неопределенности с разделением случайной и инструментальной составляющих в соответствии с ГОСТ 34100.3-2017.

В настоящее время для получения параметров полупроводниковых приборов применяются три основные группы методов. Первую группу составляют классические градиентные методы (например, метод Левенберга-Марквардта) и МНК, которые обладают высокой скоростью сходимости, но часто требуют хорошего начального приближения и могут сходиться к локальному минимуму [8, 10, 18]. Вторую группу представляют алгоритмы глобальной оптимизации: генетические алгоритмы [7, 18], алгоритмы роевого интеллекта (PSO) [4, 10] и их гибридные версии. Эти методы не требуют задания начальных условий и способны находить глобальный оптимум, однако являются вычислительно более затратными и не позволяют непосредственно оценить статистическую неопределенность получаемых параметров [7, 10]. Третья группа – это гибридные подходы, сочетающие глобальный поиск с последующей локальной оптимизацией [1, 4]. Предлагаемая в данной работе методика относится к первой группе, но отличается систематическим метрологическим анализом, включающим проверку адекватности модели и отдельную оценку случайной и инструментальной составляющих неопределенности.

Экспериментальные установки для каждого типа прибора строились по классическим схемам. Для диода (Рисунок 1а) использовалась цепь последовательно включенных источника постоянного напряжения, регулировочного и балластного резисторов, амперметра и исследуемого диода; вольтметр подключался параллельно диоду. Аналогичная схема применялась для стабилитрона, но с обратным включением прибора (Рисунок 1б).

Для биполярного транзистора была реализована схема с общим эмиттером (Рисунок 1б), содержащая два независимых источника питания – для базовой и коллекторной цепей. Для полевого транзистора использовалась схема с общим истоком (Рисунок 1г). Измерения выполнялись цифровым мультиметром, паспортные погрешности которого учитывались при оценке инструментальной составляющей неопределенности.

Обработка экспериментальных данных основывалась на регрессионном анализе. Для диода прямое смещение описывается уравнением Шокли [9]: $I_d = I_s (\exp(U_{пр}/(nU_T)) - 1)$, где I_d – прямой ток диода, I_s – ток насыщения диода, $U_{пр}$ – прямое напряжение на диоде, n – коэффициент эмиссии, U_T – температурное напряжение. Стоит отметить, что в рабочей области (при прямом смещении) экспоненциальный член становится много больше единицы. Логарифмирование приводит к линейной форме: $U = nU_T \ln I - nU_T \ln I_s$.

Для стабилитрона на участке электрического пробоя ВАХ близка к линейной: $U_{ст} = r_{диф} I_{ст} + U_0$, где $U_{ст}$ – напряжение стабилизации, $I_{ст}$ – ток стабилизации, $r_{диф}$ – дифференциальное сопротивление.

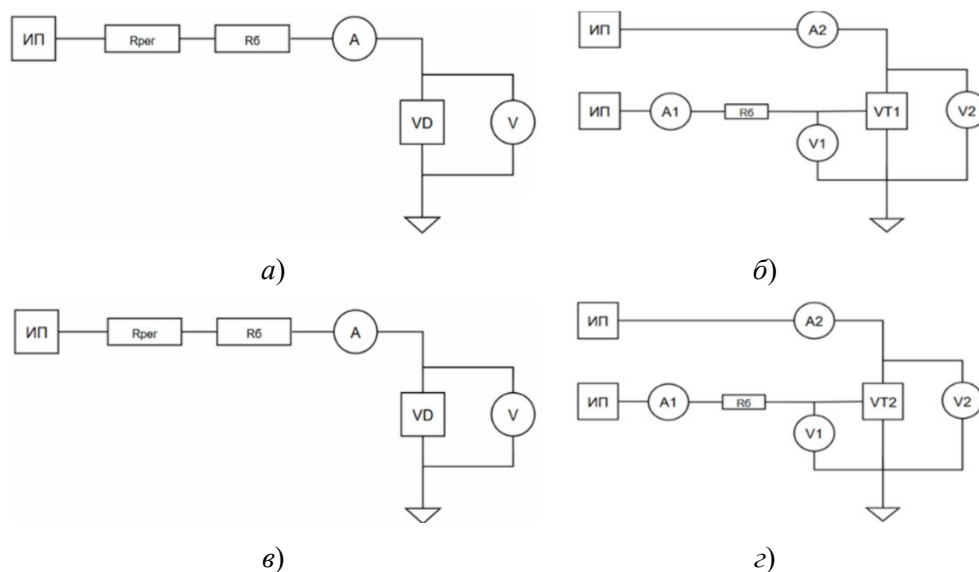


Рисунок 1 – Измерительные схемы для: а – диода; б – биполярного транзистора; в – стабилитрона; г – полевого транзистора

Figure 1 – Measurement circuits for: a – diode; b – bipolar transistor; c – zener diode; d – field-effect transistor

Для биполярного транзистора в активной области передаточная характеристика линейна: $I_K = h_{213}I_B + I_{KЭ0}$, где I_K – постоянный ток коллектора, h_{213} – статический коэффициент передачи тока биполярного транзистора, I_B – постоянный ток базы, $I_{KЭ0}$ – начальный сквозной ток коллектора.

Для полевого транзистора в области насыщения часто используют квадратичную модель: $I_C = k(U_{зи} - U_{пор})^2$, где I_C – ток стока, k – удельная крутизна (проводимость) транзистора, $U_{зи}$ – напряжение затвор-исток, $U_{пор}$ – пороговое напряжение, при котором транзистор начинает открываться. Эта модель после извлечения квадратного корня также линеаризуется: $I_C = aU_{зи} + b$.

Параметры всех моделей определялись методом наименьших квадратов [6], минимизирующим сумму квадратов остатков. Качество аппроксимации оценивалось по коэффициенту детерминации R^2 , а также по визуальному и количественному анализу остатков (QQ-графики, критерий Шапиро-Уилка) [9].

Для оценки полной неопределенности результатов учитывались две независимые составляющие. Статистическая составляющая определялась по доверительным интервалам коэффициентов регрессии (распределение Стьюдента). Инструментальная составляющая оценивалась методом предельных согласованных отклонений: экспериментальные точки смещались на $\pm \Delta U$ и $\pm \Delta I$ (паспортные погрешности мультиметра), для каждой из четырех комбинаций повторно выполнялась аппроксимация, и максимальное отклонение параметра принималось за Δ_{instr} . Случайная и инструментальная составляющие приводились к среднеквадратическому виду (СКО), затем геометрически суммировались; эффективное число степеней свободы вычислялось по формуле Уэлча-Саттертуэйта, а итоговая расширенная погрешность – с использованием коэффициента Стьюдента для доверительной вероятности $P = 0,95$ [6].

Эксперименты проведены на следующих образцах: выпрямительный диод 1N4007, стабилитрон 1N5338B, биполярный транзистор BD139-16 и полевой транзистор IRF740. Для каждого компонента была снята соответствующая характеристика – прямая ветвь ВАХ для диода, обратная ветвь в области пробоя для стабилитрона, семейства входных и выходных характеристик для биполярного транзистора и передаточная характеристика при фиксированном напряжении сток-исток для полевого транзистора.

Результаты и обсуждение

На первом этапе была экспериментально получена прямая ветвь ВАХ диода 1N4007 в диапазоне токов от 0,05 до 80 мА.

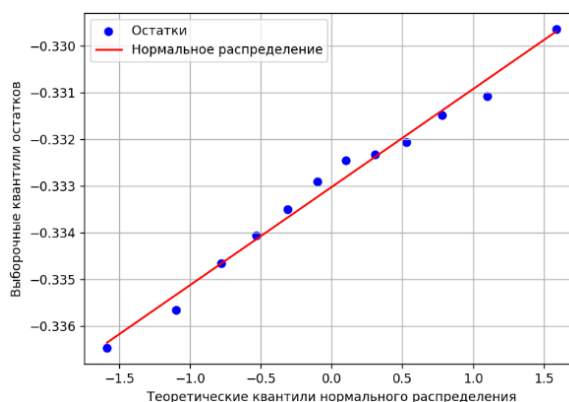


Рисунок 2 – QQ-график остатков модели МНК
Figure 2 – QQ plot of residuals of the OLS model

Аппроксимация МНК в координатах $U - \ln I$ дала уравнение: $U = 0,048211 \ln I + 0,915072$. Отсюда коэффициент эмиссии $n = 1,854$ (при комнатной температуре $U_T = 26$ мВ), ток насыщения $I_s = 5,71$ нА. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,9997$, среднее квадратичное отклонение по напряжению $RMSE = 1,875$ мВ. Сравнение с методом двух точек (опорные точки 10 мА и 80 мА) показало преимущество МНК: средняя относительная погрешность тока по всей выборке составила 10,8 % против 27,6 % у двухточечного метода. Анализ остатков, представленный на Рисунке 2 и критерий Шапиро-Уилка ($W = 0,986$, $p = 0,998$) подтвердили нормальность распределения.

Статистическая граница для $n = 0,021$, инструментальная (полученная методом наихудших комбинаций) – 0,010. Суммарная расширенная погрешность: $n = 1,854 \pm 0,023$; для I_s : $5,71 \pm 1,88$ нА. Доминирование статистической составляющей указывает на то, что основная неопределенность связана с отклонением реальной ВАХ от идеализированной модели Шокли при больших токах, а не с точностью измерительного прибора.

Для сравнения с альтернативными подходами отметим, что в работах [5, 9] значения коэффициента идеальности для кремниевых диодов, полученные с помощью генетического алгоритма, лежат в диапазоне 1,5–2,0, что согласуется с полученным в настоящей работе значением $n = 1,854 \pm 0,023$. В работе [7] с использованием алгоритма многоцелевой роевой оптимизации для p - n переходов также получены значения в этом диапазоне. Таким образом, результат, полученный регрессионным методом, находится в хорошем согласии с данными, получаемыми более сложными алгоритмами, при этом предлагаемая методика предоставляет дополнительную информацию в виде доверительных интервалов и разделения составляющих неопределенности.

Экспериментальные данные для стабилитрона 1N5338V получены при двух значениях балластного сопротивления: 3 кОм (малые токи) и 0 Ом (большие токи). Участок стабилизации, начиная с тока около 16 мА, аппроксимирован линейной моделью МНК: $U_{ст} = 3,327 \cdot 10^{-3} I_{ст} + 4,877$. Дифференциальное сопротивление $r_{диф} = 3,33$ Ом, напряжение стабилизации при среднем токе 30 мА – 4,98 В. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,970$. QQ-график остатков (Рисунок 3а) и критерий Шапиро-Уилка ($W = 0,954$, $p = 0,739$) не отвергают гипотезу о нормальности. Статистическая погрешность $r_{диф}$ (95 % доверительный интервал) составила $\pm 1,78$ Ом,

инструментальная – 0,078 Ом (Рисунок 3б). Суммарная расширенная погрешность: $r_{\text{диф}} = 3,33 \pm 1,30$ Ом, $U_{\text{ст}} = 4,98 \pm 0,052$ В. Широкий доверительный интервал объясняется малым числом экспериментальных точек на участке стабилизации ($n = 4$) и высокой чувствительностью наклона регрессии.

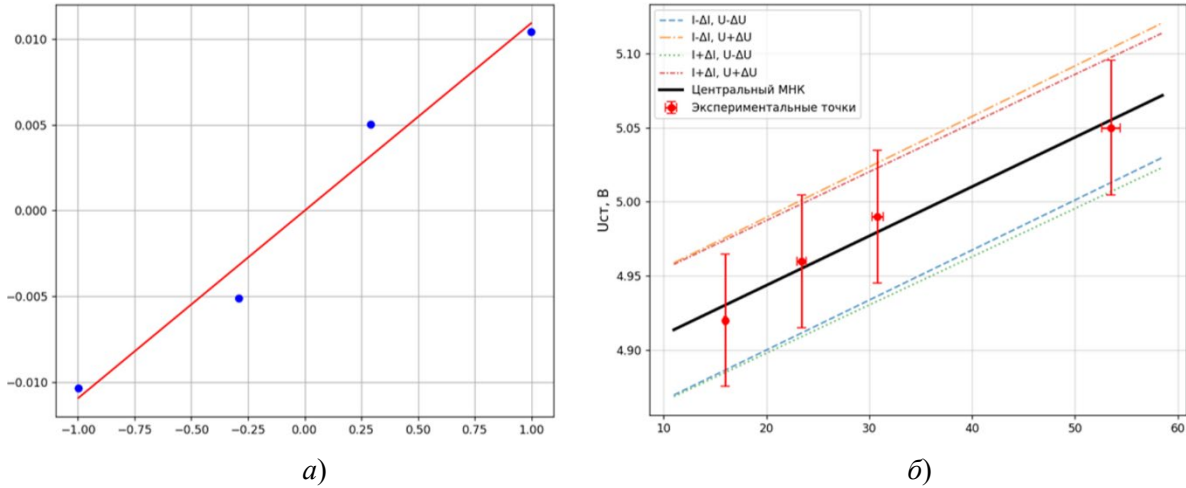


Рисунок 3 – Результаты регрессионного анализа ВАХ стабилитрона: а – QQ-график остатков; б – аппроксимация МНК для четырех комбинаций ($I \pm \Delta I, U \pm \Delta U$)

Figure 3 – Results of regression analysis of the zener diode's I-V characteristic: а – QQ plot of residuals; б – least squares approximation for four combinations ($I \pm \Delta I, U \pm \Delta U$)

Для биполярного транзистора BD139-16 были сняты входные и выходные характеристики. На основе выходных характеристик была построена передаточная характеристика при $U_{\text{кэ}} = 6$ В, линейная регрессия которой дала уравнение: $I_{\text{к}} = 0,202I_{\text{б}} + 0,500$, откуда статический коэффициент передачи тока $h_{21э} = 202$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,997$. Среднее арифметическое значение $h_{21э}$ по пяти точкам составило 205,3 (незначительное расхождение связано с легкой нелинейностью при малых токах). Анализ остатков (Рисунок 4а) с критерием Шапиро-Уилка $p = 0,833$ подтвердил адекватность линейной модели. Статистическая погрешность (полуширина 95 % доверительного интервала) – 19,1, инструментальная – 5,3 (Рисунок 4б). Суммарная расширенная погрешность: $h_{21э} = 202 \pm 18$. Как и в случае диода, доминирует случайная составляющая, что обусловлено вариацией параметров транзистора в активной области.

Для полевого транзистора IRF740 экспериментальные данные включали значения тока стока при различных $U_{\text{зи}}$ и $U_{\text{си}}$. Передаточная характеристика при $U_{\text{си}} = 9$ В была линейаризована в координатах $I_{\text{с}}(U_{\text{зи}})$. В результате получено уравнение регрессии: $I_{\text{с}} = 25,125U_{\text{зи}} - 84,976$, которое приводит к значению порогового напряжения $U_{\text{пор}} = 3,38$ В (что входит в паспортный диапазон 2–4 В). Крутизна передаточной характеристики вычислена как производная $S = dI_{\text{с}}/dU_{\text{зи}} = 2a(aU_{\text{зи}} + b)$ в рабочей точке $U_{\text{зи}} = 3,77$ В, $S = 490$ мА/В. Для сравнения, крутизна, определённая по конечным приращениям, дала значения от 136 до 556 мА/В.

Остатки модели (Рисунок 5а) подчиняются нормальному распределению ($p = 0,251$ по критерию Шапиро-Уилка). Дисперсия крутизны рассчитана с учетом ковариации коэффициентов регрессии по формуле:

$$s_s^2 = \left(\frac{\partial S}{\partial a}\right)^2 s_a^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial b}\right)^2 s_b^2 + 2 \frac{\partial S}{\partial a} \frac{\partial S}{\partial b} \text{cov}(a, b),$$

где s_a^2 и s_b^2 – дисперсии коэффициентов регрессии, $cov(a, b)$ – ковариация коэффициентов, $\frac{\partial S}{\partial a}$ и $\frac{\partial S}{\partial b}$ – частные производные функции по соответствующим параметрам. Ее значение составило $(s_S)^2 = 2264$, откуда $s_S = 47,6$ мА/В.

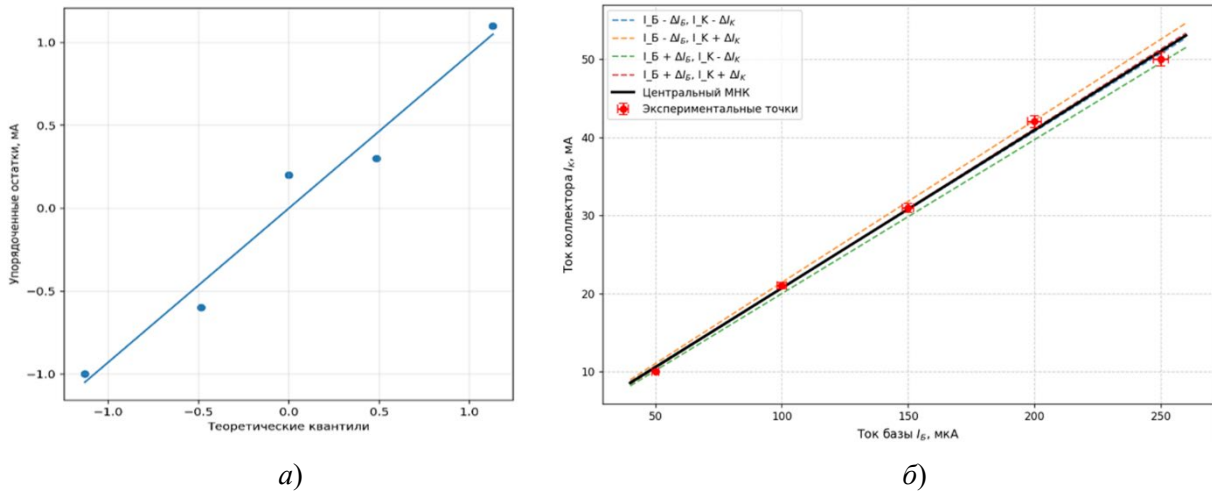


Рисунок 4 – Результаты регрессионного анализа передаточной характеристики биполярного транзистора: *a* – QQ-график остатков; *б* – аппроксимация МНК для четырех комбинаций $(I_B \pm \Delta I_B, I_K \pm \Delta I_K)$

Figure 4 – Results of regression analysis of the transfer characteristic of a bipolar transistor: *a* – QQ plot of residuals; *b* – least squares approximation for four combinations $(I_B \pm \Delta I_B, I_K \pm \Delta I_K)$

Инструментальная погрешность $\Delta S_{instr} = 10,8$ мА/В (методом наихудших комбинаций, Рисунок 5б). Суммарное СКО – 48 мА/В, расширенная погрешность (при $P = 0,95$) $S = 490 \pm 150$ мА/В. Столь широкая неопределенность вызвана сильной корреляцией коэффициентов регрессии и малым объемом выборки, что является характерной проблемой при оценке крутизны по квадратичной модели.

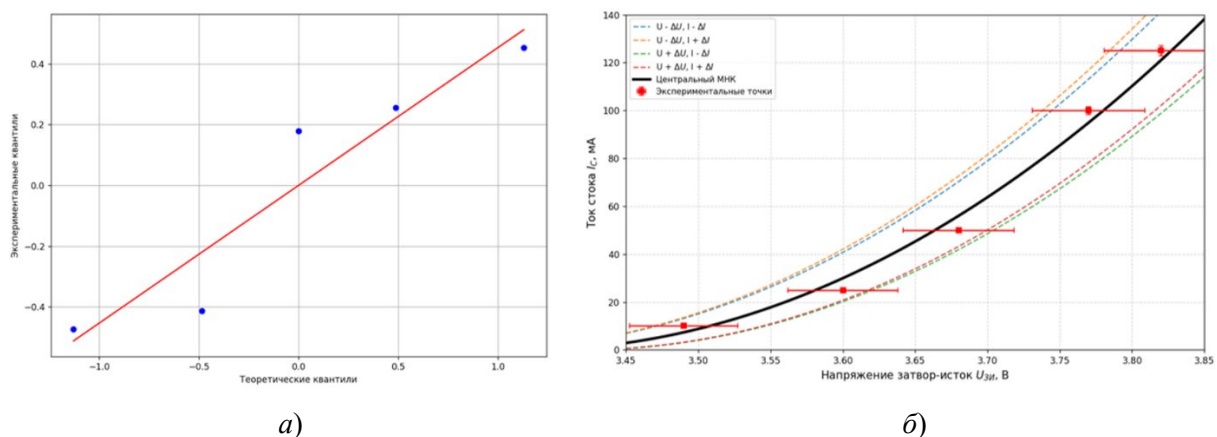


Рисунок 5 – Результаты регрессионного анализа передаточной характеристики полевого транзистора: *a* – QQ-график остатков; *б* – аппроксимация передаточной характеристики с учетом границ инструментальной погрешности $(U \pm \Delta U, I \pm \Delta I)$

Figure 5 – Results of regression analysis of the transfer characteristic of a field-effect transistor: *a* – QQ plot of residuals; *b* – approximation of the transfer characteristic taking into account the limits of instrumental error $(U \pm \Delta U, I \pm \Delta I)$

Сравнение с методами оптимизации (генетические алгоритмы, роевой интеллект) показывает, что предлагаемый регрессионный подход, хотя и уступает им в нахождении глобального оптимума без начального приближения, имеет некоторые преимущества для метрологических задач:

- позволяет получить аналитические выражения для параметров модели;
- дает возможность статистической проверки адекватности модели (анализ остатков, критерий Шапиро-Уилка);
- обеспечивает отдельную оценку случайной и инструментальной составляющих неопределенности с построением доверительных интервалов в соответствии с ГОСТ 34100.3–2017.

Последнее особенно важно для задач контроля качества и метрологического сопровождения, где требуется не только точечная оценка параметра, но и его интервальная неопределенность.

Заключение

Таким образом, разработанная методика, основанная на регрессионном анализе и полном учете неопределенностей, позволяет получать интервальные оценки параметров полупроводниковых компонентов, которые могут быть использованы для контроля качества, сопоставления с паспортными данными и метрологического сопровождения измерений. Показано, что во всех исследованных случаях доминирующий вклад вносит статистическая (случайная) составляющая, а инструментальная погрешность мультиметра оказывается пренебрежимо малой по сравнению с разбросом, обусловленным несовершенством реальных характеристик и ограниченностью экспериментальных данных.

Проведенное сопоставление с литературными данными, полученными с использованием генетических алгоритмов и роевого интеллекта, показывает, что результаты регрессионного анализа находятся в хорошем согласии с результатами более сложных методов, при этом предлагаемая методика предоставляет дополнительные метрологические характеристики (доверительные интервалы, разделение неопределенностей), что делает ее предпочтительной для задач метрологического контроля.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Toledo F.J., Blanes J.M., Galiano V. Two-Step Linear Least-Squares Method For Photovoltaic Single-Diode Model Parameters Extraction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018;65(8):6301–6308. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2793216>
2. Rohrer R., Fan S.P., Claudio L. Automated bipolar junction transistor d.c. model parameter determination. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1971;6(4):260–262. <https://doi.org/10.1109/JSSC.1971.1050176>
3. Цветков Р.В., Сушников В.А., Ванина П.Ю., Мешалкина М.Н. Моделирование влияния биения сверла при изготовлении упругого элемента тензорезисторного датчика силы в виде двойной консольной балки на точность измерения датчиков силы. *Перспективы науки*. 2024;(4):129–133.
Tsvetkov R.V., Sushnikov V.A., Vanina P.Yu., Meshalkina M.N. Modeling the influence of drill runout during the manufacture of an elastic element of a strain-resistive force sensor in the form of a double cantilever beam on the measurement accuracy of force sensors. *Science Prospects*. 2024;(4):129–133. (In Russ.).
4. Vuddagiri T.V.S.N., Das S. Determination of Semiconductor Diode Parameters Using Multi-Objective Quantum-Inspired Particle Swarm Optimization Algorithm. In:

- Proceedings of the SoutheastCon 2025, 22–30 March 2025, Concord, NC, USA. IEEE; 2025. P. 1334–1335. <https://doi.org/10.1109/SoutheastCon56624.2025.10971617>*
5. Стрельчук А.М., Лебедев А.А., Булат П.В. Характеристики выпрямительных диодов Шоттки на основе карбида кремния при повышенных температурах. *Физика и техника полупроводников*. 2020;54(12):1364–1367. <https://doi.org/10.21883/FTP.2020.12.50238.9494>
Strel'chuk A.M., Lebedev A.A., Bulat P.V. Characteristics of Schottky Rectifier Diodes Based on Silicon Carbide at Elevated Temperatures. *Semiconductors*. 2020;54(12):1624–1627. <https://doi.org/10.1134/S1063782620120374>
6. Cheung S.K., Cheung N.W. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*. 1986;49(2):85–87. <https://doi.org/10.1063/1.97359>
7. Almashary B.A. Genetic Algorithm Based Diode Model Parameters Extraction. *Journal of King Saud University. Engineering Sciences*. 2006;18(2):249–260. [https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30838-9](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30838-9)
8. Olikh O. Review and test of methods for determination of the Schottky diode parameters. *Journal of Applied Physics*. 2015;118(2):024502. <https://doi.org/10.1063/1.4926420>
9. Dib S., De La Bardonnie M., Khoury A., Pelanchon F., Mialhe P. A new method for the extraction of diode parameters using a single exponential model. *Active and Passive Electronic Components*. 2000;22(3):157–163. <https://doi.org/10.1155/2000/31390>
10. Popov S.A., Korchagin A.F. Multiple-Response Models for Calculating Electronic Device Parameters. *Measurement Techniques*. 2003;46(4):391–396. <https://doi.org/10.1023/A:1024873315296>
11. Baturina N.Yu., Kalienko I.V. Construction of Two-Dimensional Regression Models of the Current-voltage Characteristics of the Output Current of Field-Effect Transistors Using the PLEXP Information System. *Measurement Techniques*. 2020;62(11):980–988. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01723-1>
12. Ocaya R. *Extraction of Semiconductor Diode Parameters: A Comparative Review of Methods and Materials*. Cham: Springer; 2024. 174 p.
13. Meshalkina M., Sushnikov V., Kryzhova N. The estimation of formaldehyde concentration in indoor air. *MATEC Web of Conferences*. 2018;245(8):03003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824503003>
14. Бирюков В.Н. Определение параметров модели полевого транзистора в равномерном приближении. *Журнал радиоэлектроники*. 2025;(10). (На англ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.10.5>
Biryukov V.N. Extraction of transistor model parameters in uniform approximation. *Journal of Radio Electronics*. 2025;(10). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.10.5>
15. Цветков Р.В., Сушников В.А., Ванина П.Ю., Мешалкина М.Н. Моделирование влияния неточности позиционирования сверла при изготовлении упругого элемента тензорезисторного датчика силы в виде двойной консольной балки. *Перспективы науки*. 2024;(4):134–137.
Tsvetkov R.V., Sushnikov V.A., Vanina P.Yu., Meshalkina M.N. Modeling the influence of drill positioning inaccuracy in the manufacture of an elastic element of a strain-resistive force sensor in the form of a double cantilever beam. *Science Prospects*. 2024;(4):134–137. (In Russ.).
16. Tretyakov T.I., Nikolayev I.I., Drozdova A.A. Software Module for Determining Parameters of a Bipolar Transistor SPICE-Model Using Static Volt-Ampere Characteristics. In: *Proceedings of the 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 29 June – 30 July 2023,*

- Novosibirsk, Russia. IEEE; 2023. P. 490–494. <https://doi.org/10.1109/EDM58354.2023.10225154>*
17. Григорьян Л.Р., Богатов Н.М., Григорьян Р.Л., Сахно М.А. Фазовые методы решения измерительных задач контроля параметров электронных устройств. *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль.* 2025;(4):116–124. <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2025-4-14>
Grigoryan L.R., Bogatov N.M., Grigoryan R.L., Sakhno M.A. Hase methods for solving measurement tasks for monitoring parameters of electronic devices. *Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(4):116–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2025-4-14>
18. Vatansever F., Boz A.F. Diode parameter extractions and comparisons using the least square method, neural networks and genetic algorithms. *Scientific Research and Essays.* 2010;5(10):1155–1163.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Цветков Руслан Вадимович, старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: tsvetkov_rv@spbstu.ru
ORCID: [0009-0002-7490-6465](https://orcid.org/0009-0002-7490-6465)

Ruslan V. Tsvetkov, Senior Lecturer, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, the Russian Federation.

Ванина Полина Юрьевна, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: vanina_pyu@spbstu.ru
ORCID: [0000-0002-4113-0405](https://orcid.org/0000-0002-4113-0405)

Polina Yu. Vanina, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Lecturer, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, the Russian Federation.

Мешалкина Марина Николаевна, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: meshalkina_mn@spbstu.ru
ORCID: [0000-0002-1906-2055](https://orcid.org/0000-0002-1906-2055)

Marina N. Meshalkina, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, the Russian Federation.

Сушников Виктор Александрович, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: sushnikov_va@spbstu.ru

Viktor A. Sushnikov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 22.06.2026; одобрена после рецензирования 30.09.2026; принята к публикации 13.10.2026.

The article was submitted 22.06.2026; approved after reviewing 30.09.2026; accepted for publication 13.10.2026.