

Разработка метода аналогового сигнатурного анализа

*Д.А. Крюков, М.В. Ланкин, А.М. Ланкин, Е. Н. Блажкова,
Е. С. Гороховатенко, И. А. Огородников*

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М. И. Платова, Новочеркасск*

Аннотация: В наши дни, из-за роста массового производства электронных устройств, возникает необходимость в быстрой и точной проверке их характеристик. При этом тестирование устройства, как правило, включает в себя совокупность различных типов проверки, выполняемых на разных этапах технологического процесса производства. В частности, для этих целей используется метод аналогового сигнатурного анализа. Он позволяет быстро обнаруживать неисправности на компонентном уровне, что делает его полезным на различных этапах производства, таких как входной контроль, тестирование печатных плат или ремонт неисправных устройств. В данной статье рассматриваются основные принципы работы метода, а также особенности его применения.

Ключевые слова: аналоговый сигнатурный анализ, тестирование на компонентном уровне, вольт-амперная характеристика, локализация неисправностей.

Метод аналогового сигнатурного анализа (ASA) является одним из методов тестирования электронных компонентов, участков цепи или печатных плат [1, 2]. Данный метод может быть использован на разных этапах производства, таких, как входной контроль, регулировка радиоэлектронной аппаратуры, а также ремонт неисправных изделий [3]. Приборы, использующие данный метод, являются активными, то есть они подают на электрическую схему сигнал на вход, а на выходе регистрирует отклик схемы.

Данный метод основан на сравнении двух сигнатур, одна из которых принята за эталонную. Сравнение можно проводить двумя способами: использовать элемент или прототип испытуемого устройства в качестве эталона или использовать моделирование, использующее заранее записанные сигнатуры. Моделирование позволяет автоматизировать проверку на этапе разработки и проектирования схем, имитировать выполнение функций схем, имитировать поведение и неисправности схем, а также тестировать схемы на основе тестовых последовательностей. Использование моделирования

позволяет сократить затраты времени и ресурсов, а также существенно облегчить выявление неисправностей [4].

Сигнатурой называется некоторая цифровая последовательность, которая является откликом на выходе проверяемого элемента в ответ на тестовый сигнал. В данном случае тестовый сигнал и отклик имеют аналоговый характер. Тестовый сигнал представляет собой двуполярный синусоидальный сигнал с изменяемыми параметрами напряжения, силы тока и частоты. Откликом системы является вольт-амперная характеристика анализируемого элемента.

Проверка электрических схем или элементов происходит без подачи питания и предварительно разряженными конденсаторами. Это является основным преимуществом метода аналогового сигнатурного анализа, так как тестирование может проводиться при невозможности запустить проверяемый блок, а также при наличии короткого замыкания. Также преимуществом данного метода является возможность испытывать печатные платы без документации к ним, так как проверка происходит на компонентном уровне. Ещё одним плюсом использования аналогового сигнатурного анализа является возможность дополнить функциональное тестирование. Это позволяет быстрее обнаруживать дефектные элементы при диагностике печатной платы [5].

На рис. 1 представлена упрощённая функциональная схема устройств [6, 7], использующих метод аналогового сигнатурного анализа. Генератор тестового сигнала имеет внутреннее сопротивление $R_{г}$. Тестируемый элемент является нагрузкой и имеет собственный импеданс. Во время проверки сопротивление элемента подключено с сопротивлением источника последовательно, и они представляют собой делитель напряжения. Падение напряжения зависит от сопротивления $R_{г}$, так как сопротивление

тестируемого элемента является неизменным. Дисплей предназначен для вывода информации о состоянии процесса проверки.

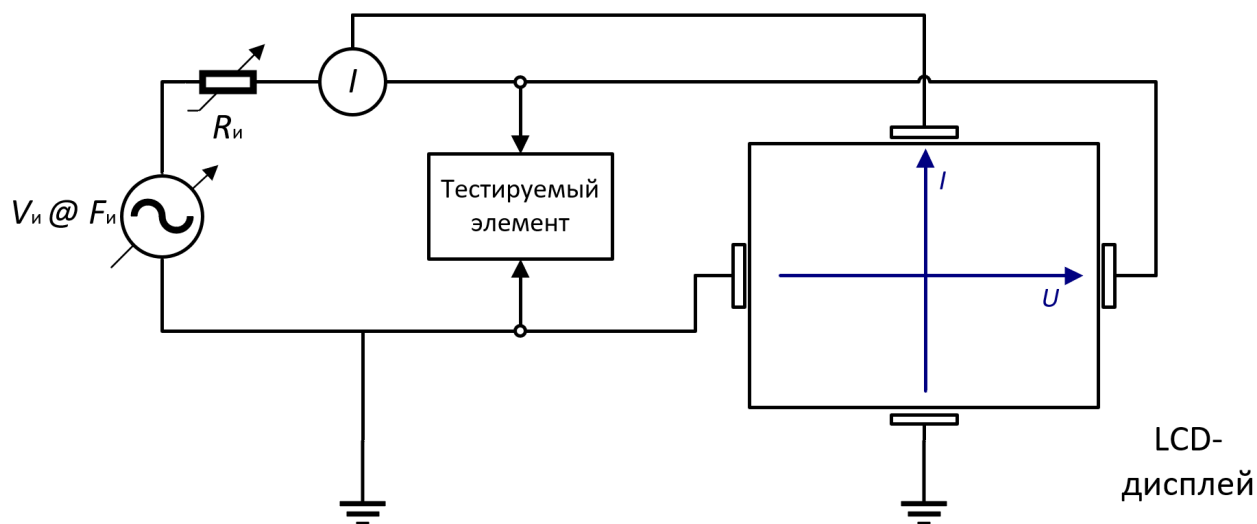


Рисунок 1. – Упрощенная функциональная схема сигнатурного анализатора

Тестовый сигнал имеет следующие регулируемые параметры: $U_{и}$ – напряжение источника, $R_{и}$ – сопротивление источника, $F_{и}$ – частоту сигнала источника. Данные параметры задаются пользователем или в автоматическом режиме для получения наиболее точных данных об испытуемом компоненте.

Для получения сигнатур двухполюсных элементов необходимо подключить щупы к выводам тестируемого компонента, или подключить один из щупов к выводу компонента, а второй - к общей шине заземления. Каждый двухполюсный элемент имеет собственную характеристику. Например, сигнатуры резисторов представляют собой наклонную прямую линию, так как отношение напряжения к протекающему току линейно. Сигнатуры конденсаторов и индуктивностей имеют формы эллипсов, так как элементы являются реактивными и производят фазовый сдвиг между током и напряжением. Характеристики полупроводниковых компонентов имеют

излом на кривой. На рис. 2 показаны типовые сигнатуры различных компонентов [3, 6].

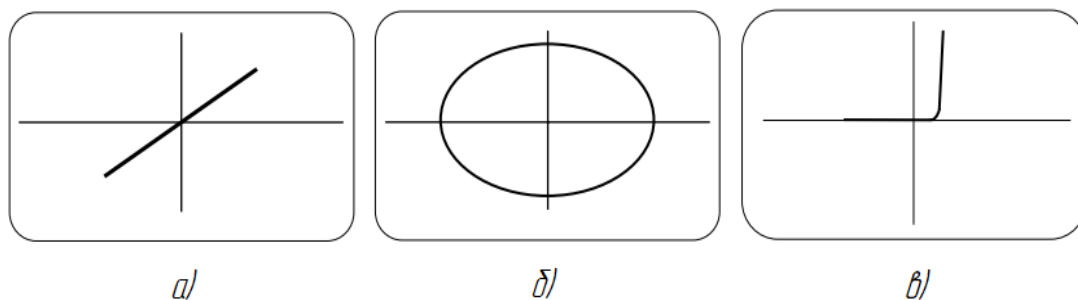


Рисунок 2. – Типовые сигнатуры компонентов: а) – Сигнатура резистора; б) – Сигнатура конденсатора; в) – Сигнатура диода

Транзистор является трёхполюсным элементом, и его проверка проходит следующим образом: либо используются семейства сигнатур для двухполюсника, либо происходит проверка с использованием источника постоянного напряжения на третьем управляющем электроде. При первом варианте сигнатура представлена семейством из трёх кривых, полученных между различными выводами. Транзисторы имеют два полупроводниковых перехода, следовательно, сигнатура база-эмиттер аналогична работе стабилитрона, а сигнатура база-коллектор аналогична работе диода [8]. На рис. 3 представлены типовые сигнатуры работы транзистора.

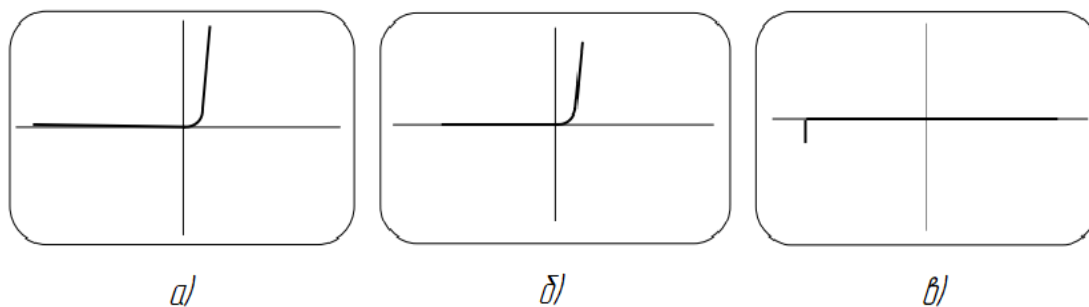


Рисунок 3. – Типовая сигнатура *n-p-n* транзистора: а) – База-эмиттер; б) – База-коллектор; в) – Эмиттер-коллектор

Во втором варианте проверки с использованием источника постоянного напряжения сигнатура представляет собой одну кривую. Для её получения необходимо подключить источник напряжения на базу, а измерительные щупы на остальные выводы. Данный способ позволяет проверить работоспособность и коэффициент усиления транзистора при помощи изменения напряжения, подаваемого на базу [4]. Сигнатура, полученная таким способом представлена на рис.4.

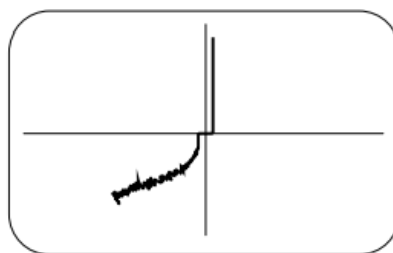


Рисунок 4. – Типовая сигнатура *n-p-n* транзистора с использованием источника постоянного напряжения

В связи с тем, что сигнатуры имеют сложный характер, это затрудняет их сравнение с эталонными. Поэтому необходимо снизить размерность анализируемой информации. Для снижения размерности анализируемой информации в настоящее время все чаще находит применение проекционный подход, использующий метод главных компонент (ГК) [9, 10]. Сущность метода главных компонент состоит в переходе от исходных переменных к новым величинам – главным компонентам (ГК), которые представляют собой линейные комбинации исходных переменных, имеющих максимально возможную дисперсию. При этом первая главная компонента обладает максимальной дисперсией и является нормированной линейной комбинацией всех возможных исходных признаков, вторая – учитывает максимальное значение оставшейся дисперсии и корреляционно не связана с первой компонентой, и так далее до n (n – количество ГК).

В качестве иллюстрации рассмотрим применение метода главных компонент в общем виде для двух сигнатур $y_1=f_1(x)$ и $y_2=f_2(x)$.

Каждую из рассматриваемых сигнатур можно представить в виде выражения:

$$y=f(x_1, x_2, x_3\dots | a_1, a_2, a_3\dots) + \varepsilon, \quad (1)$$

где $f(x_1, x_2, x_3, \dots | a_1, a_2, a_3, \dots)$ – составляющая, несущая латентную информацию о признаках исследуемого объекта, ε – составляющая, несущая информацию о шумах (случайные помехи, случайные составляющие погрешности измерений).

Задавшись фиксированным рядом значений независимых переменных x_i (i изменяется от 0 до n), представим рассматриваемые кривые в виде матрицы \mathbf{Y} :

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1(x_0) & y_2(x_0) \\ y_1(x_1) & y_2(x_1) \\ \vdots & \vdots \\ y_1(x_n) & y_2(x_n) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Каждая строка матрицы (2), в силу наличия случайной составляющей в выражении (1), представляет собой координату точки, а вся совокупность этих точек может быть рассмотрена, как распределенные случайным образом значения двумерной величины \mathbf{Y} в системе координат (y_1, y_2) (рис. 5)

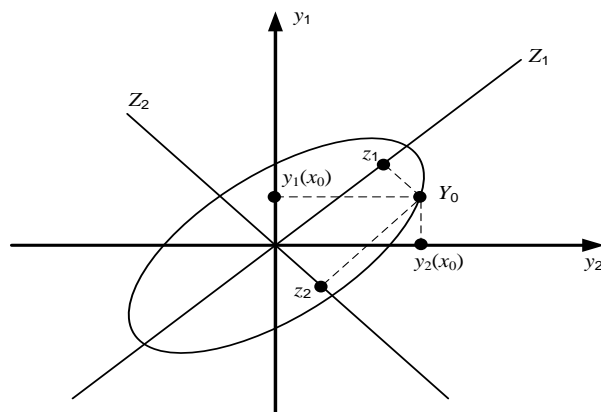


Рисунок 5. – Проецирование в пространство главных компонент

В нашем случае для описания исходного распределения переменных y_1 и y_2 , требуется две прямые Z_1 и Z_2 (рис. 5).

$$Z_1 = \beta_{11} \cdot y_1 + \beta_{12} \cdot y_2; Z_2 = \beta_{21} \cdot y_1 + \beta_{22} \cdot y_2. \quad (3)$$

Линейные комбинации (3) исходных переменных y_1, y_2 являются ГК. Общее число ГК равно числу описываемых переменных, но на практике для описания n переменных не всегда требуются n ГК [9]. Необходимость включения той или иной ГК определяется тем, насколько большой объём исходного распределения она описывает, т.е. какой объём информации об исходных переменных она несёт.

Представим исходные зависимости (3) в матричном виде:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{B}, \quad (4)$$

где $\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix}$ – матрица значений главных компонент; $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{21} \\ \beta_{12} & \beta_{22} \end{bmatrix}$ –

матрица значений коэффициентов.

Первая задача анализа ГК заключается в нахождении матрицы главных компонент с максимальной дисперсией. Поэтому найдём максимальную дисперсию D матрицы \mathbf{Z} , используя при этом следующее свойство дисперсии:

$$D(c \cdot y) = c^2 \cdot D(y),$$

где c – некоторая константа.

Тогда:

$$D(\mathbf{Z}) = D(\mathbf{Y} \cdot \mathbf{B}); D(\mathbf{Y} \cdot \mathbf{B}) = \mathbf{B}^T \cdot D(\mathbf{Y}) \cdot \mathbf{B}, \quad (5)$$

где \mathbf{B}^T – транспонированная матрица значений коэффициентов β .

Если учесть, что дисперсия двух случайных величин является их ковариацией, то выражение (5), можно записать в следующем виде:

$$D(\mathbf{Z}) = \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{B}, \quad (6)$$

где \mathbf{S} – ковариационная матрица исходных переменных y_1 и y_2 .

Для того чтобы эта дисперсия определялась однозначно, необходимо ввести ограничение на \mathbf{V} . Для этого нормируем оба вектора, входящих в матрицу \mathbf{V} . Отметим, что выражение (6) описывает квадратичную поверхность, положение которой определяется ковариационной матрицей исходных переменных, причем матрица, обратная матрице \mathbf{S} , определяет положение в пространстве эллипса, изображённого на рис. 5. Задача нахождения максимума функции, являющегося решением уравнения (6), решается различными способами, сводящимися к решению уравнения:

$$(\mathbf{S} - \lambda \mathbf{R})\mathbf{V} = 0,$$

где λ – постоянный множитель; \mathbf{R} – единичный вектор в плоскости y_1, y_2 .

Решение этого уравнения заключается в нахождении корней характеристического уравнения $|\mathbf{S} - \lambda \mathbf{R}| = 0$, представляющего собой алгебраическое уравнение относительно λ . Полученные значения λ являются характеристическими корнями матрицы \mathbf{S} . И каждому значению характеристического корня соответствует определённый вектор \mathbf{V} , т.е. характеристический вектор матрицы \mathbf{S} .

Если учесть тот факт, что характеристические векторы матрицы \mathbf{S} и \mathbf{S}^{-1} идентичны и ортонормированны, т.е. перпендикулярны друг другу и имеют единичную длину, то смысл выражения (4) может быть интерпретирован как разложение вектора $[y_1(x_i) \ y_2(x_i)]$ в плоскости y_1, y_2 по базису характеристических векторов \mathbf{V} . Действительно, каждая точка Y_0 с координатами $(y_1(x_0), y_2(x_0))$ из распределения y_1 и y_2 представляется в следующем виде,

$$z_1 = Y_0 \cdot \beta_1; z_2 = Y_0 \cdot \beta_2$$

или, что равносильно:

$$z_1 = [y_1(x_0) \quad y_2(x_0)] \cdot \begin{bmatrix} \beta_{11} \\ \beta_{12} \end{bmatrix}; \quad z_2 = [y_1(x_0) \quad y_2(x_0)] \cdot \begin{bmatrix} \beta_{21} \\ \beta_{22} \end{bmatrix},$$

где β_1 и β_2 – соответственно столбцы матрицы \mathbf{B} .

Фактически значения z_1 и z_2 – это координаты точки Y_0 в новом базисе, образованном характеристическими векторами матрицы \mathbf{S} , являющейся матрицей ковариаций исходных переменных y_1 и y_2 . Значения этих координат определяются тем, для какого из найденных собственных чисел получен соответствующий собственный вектор. И это значение прямо пропорционально значению λ .

Обобщая, можно сказать, что при разложении точки некоторого распределения по координатам базиса, образованного характеристическими векторами ковариационной матрицы, значения получаемых координат напрямую зависят от соответствующих значений характеристических корней, т.е. вектору, у которого значение λ больше, соответствуют большие значения координат и наоборот.

Значимость той или иной ГК выражается через её участие в общей дисперсии, т.е.

$$\kappa_i = \frac{D(Z_i)}{\sum_{i=1}^n D(Z_i)} = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}, \quad (7)$$

где κ_i – значимость ГК.

Обычно учитываются только $(n-l)$ наибольших ГК, сумма значимостей которых лежит в пределах $0,8 \div 0,99$ (l – количество незначимых ГК).

Таким образом, каждая из сравниваемых сигнатур проецируется в пространство ГК, где она имеет вид точки в новом ортогональном пространстве с 2 или 3 координатами и сравнивается с эталонными.

Вывод: метод аналогового сигнатурного анализа имеет массу преимуществ, позволяющих ускорить и облегчить выявление дефектных

элементов на различных этапах производства, а также облегчить этапы разработки и проектирования новых электронных схем. Изучение данного метода позволит решить множество задач, ускоряющие процесс производства, а также поспособствует созданию основы в получении научных результатов в дальнейшем процессе обучения.

Литература

1. Воронов Д.С., Кривошеин А.И. Измерение вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов методом аналогового сигнатурного анализа. // Аллея науки. – 2017. – Т. 1. – № 10. – С. 723-728.
 2. Oeftering R. C., Wade R. P., Izadnegahdar A. Component-Level Electronic-Assembly Repair (CLEAR) Spacecraft Circuit Diagnostics by Analog and Complex Signature Analysis. – 2011. 37 p.
 3. Крушной В.В. Основы теории информации и кодирования. // Снежинск. – СГТФА. – 2005. 69 с.
 4. Каландия Г. Г., Дюдюн Д. Е. Основные методы анализа цифровых и аналоговых микросхем в радиоэлектронной промышленности. // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. №1. 2018. С. 13-17.
 5. Диагностика печатных плат без документации. Добавление диагностики компонентного уровня к системам, выполняющим функциональное тестирование. URL: docplayer.ru/26000849-Diagnostika-pechatnyh-plat-bez-dokumentacii-dobavlenie-diagnostiki-komponentnogo-urovnya-k-sistemam-vypolnyayushchim-funkcionalnoe-testirovanie.html .
 6. Fundamentals of Signature Analysis. An In-depth Overview of Power-off Testing Using Analog Signature Analysis. Huntron. 2009. 51 p. URL: smtnet.com/library/files/upload/ASA%20white%20paper.pdf.
 7. Fundamentals of Signature Analysis., 30 p. URL: huntron.com/corporate/docs/ASA-paper-extract.pdf.
-

8. Локализатор неисправностей SFL3000. Руководство по эксплуатации. 45 с. URL: ron.terraelectronica.ru/pdf/show?pdf_file=%252Fz%252FDatasheet%252FS%252FSFL1500_3000.pdf.
9. Эсбенсен, К. Анализ многомерных данных. Избранные главы. / Пер. с англ. Кучерявского С.В. Под ред. Родионовой О.Е. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2003. – 157 с.
10. Бутенко Д.В. Использование инверсионного многомерного классифицирования в концептуальном проектировании. // Инженерный вестник Дона, 2012, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1022.

References

1. Voronov D.S., Krivoshein A.I. Alleja nauki. 2017. Т. 1. № 10. pp. 723-728.
 2. Oeftering R. C., Wade R. P., Izadnegahdar A. Component-Level Electronic-Assembly Repair (CLEAR) Spacecraft Circuit Diagnostics by Analog and Complex Signature Analysis. 2011. 37 p.
 3. Krushnyj V.V. Osnovy teorii informacii i kodirovanija [Foundations of information theory and coding]. Snezhinsk. SGTFA. 2005. 69 p.
 4. Kalandija G. G., Djudjun D. E. Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta. №1. 2018. pp. 13-17.
 5. Diagnostika pechatnyh plat bez dokumentacii. Dobavlenie diagnostiki komponentnogo urovnja k sistemam, vpolnjajushhim funkcional'noe testirovanie. [Diagnostics of printed circuit boards without documentation. Add component-level diagnostics to systems that perform functional testing]. URL: docplayer.ru/26000849-Diagnostika-pechatnyh-plat-bez-dokumentacii-dobavlenie-diagnostiki-komponentnogo-urovnya-k-sistemam-vpolnyayushchim-funkcionalnoe-testirovanie.html.
-



6. Fundamentals of Signature Analysis. An In-depth Overview of Power-off Testing Using Analog Signature Analysis. Huntron. 2009. 51 p. URL: smtnet.com/library/files/upload/ASA%20white%20paper.pdf.
7. Fundamentals of Signature Analysis, 30 p. URL: huntron.com/corporate/docs/ASA-paper-extract.pdf.
8. Lokalizator neispravnostej SFL3000. Rukovodstvo po jekspluatacii [Fault locator SFL3000. Manual]. 45 p. URL: ron.terraelectronica.ru/pdf/show?pdf_file=%252Fz%252FDatasheet%252FS%252FSFL1500_3000.pdf.
9. Jesbensen, K. Analiz mnogomernyh dannyh. Izbrannye glavy. [Analysis of multivariate data. Selected chapters.]. Barnaul: Izd-vo Alt. un-ta, 2003. 157 p.
10. Butenko D.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1022.