

# Система автоматизированного тестирования аттенюаторов, фазовращателей и переключателей X-диапазона с цифровым управлением на пластине

А.И. Торгованов

АО «НПП «Салют»

**Аннотация:** рассматривается система автоматизированного тестирования СВЧ-микросхем X-диапазона с цифровым управлением, построенная на базе векторного анализатора цепей. Обсуждаются вопросы разработки блока управления для тестируемых монолитных интегральных микросхем СВЧ, и программное обеспечение, написанное на языке Python.

**Ключевые слова:** автоматизация, измерения на СВЧ, аттенюатор, фазовращатель, переключатель, АФАР, радар, радиолокация, векторный анализатор, зондовая станция, микроэлектроника, арсенид галлия

## 1. Введение

Активные фазированные решетки (АФАР) являются наиболее перспективным направлением развития радиолокации. Современные АФАР состоят из десятков и сотен активных элементов, в каждом из которых состоит есть приёмопередающий модуль. Синтез диаграммы направленности и электронное сканирование осуществляется за счет изменения амплитудно-фазовых соотношений на элементах решётки, поэтому каждый модуль оснащён перестраиваемым аттенюатором и фазовращателем с цифровым управлением. Производство новых радаров с АФАР и техническое обслуживание существующих требует организацию серийного выпуска тысяч аттенюаторов и фазовращателей в месяц. Выпуск изделий в таких масштабах требует применение автоматизации измерений при выходном контроле.

## 2. Автоматизированная измерительная система

АФАР состоит из множества приемо-передающих модулей, в состав каждого, из которых входит усилитель мощности, малошумящий усилитель, смеситель, цифровой фазовращатель, аттенюатор и переключатель (рисунок 1). Аттенюаторы и фазовращатели с цифровым управлением используются для синтеза диаграммы направленности, как на приём так и на передачу. От технологического разброса параметров цифровых фазовращателей и аттенюаторов зависит насколько точно расчетная диаграмма направленности РЛС будет совпадать с реальной, точность определения направления на объект, разрешение по дальности, качество подавления активных и пассивных помех. Поэтому к числу необходимых для тестирования электрических характеристик монолитных СВЧ микросхем добавлены параметры, описывающие поведение на основе статистики: минимальные, максимальные, средние значения модулей и фаз, а также среднеквадратичные ошибки их установки.

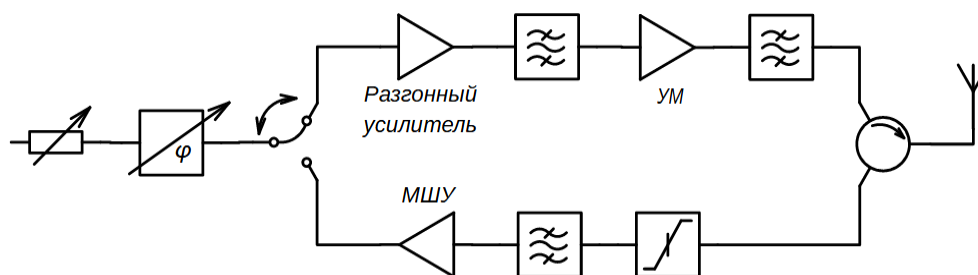
Основные требования к разрабатываемой системе:

- Производительность;
- Точность измерений;
- Размер файлов измерений;
- Сквозной цикл проектирования, сравнение измерений с моделированием.

Основной функционал автоматизированной измерительной системы:

- Управление перемещениями столика зондовой станции;

- Управление прецизионным источником-измерителем;
- Управление переключением состояний модуля;
- Измерение  $S$ -параметров и ток потребления по цепям питания для каждого из состояний МИС;
- Расчёт на основе измеренных  $S$ -параметров характеристики модуля;
- Запись данных измерения МИС в файл, и протокол измерений пластины в таблицу;
- Сортировка кристаллов по критерию годен-негоден, построение карты пластины.



**Рисунок 1.** Типовая структура приёмо-передающего модуля активной фазированной решётки

При разработке первой версии системы упор был сделан на скорость разработки и корректность работы алгоритмов. Из всех тестируемых монолитных микросхем самый длинный цикл измерений 2,4 с у 5-битного аттенюатора. Таким образом оценка производительности измерительной системы даёт 1,000 кристаллов за 40 мин., а с учётом времени требующегося на прогрев, калибровку и первоначальную настройку системы 140,000 кристаллов/мес. При этом существует большой резерв для повышения производительности системы с использованием существующего оборудования за счёт: отключения экранов измерительных приборов, перехода от универсальных функций для управления оборудованием к оптимизированным под конкретную задачу, использования аппаратного триггера вместо программного, обмена данными с приборами в бинарном формате. Однако на данном этапе существования проекта дополнительные трудозатраты на оптимизацию производительности не имеют смысла в виду того, что она в несколько раз превышает возможности производства.

**Таблица 1.** Погрешности используемых векторных анализаторов цепей

	Keysigh, R&S, Planar	Микран
КСВН = 2	0,02 $\angle$ 2,32°	0,05 $\angle$ 4,72°
S21 = -25... 2 дБ	0,11 дБ $\angle$ 1,15°	0,22 дБ $\angle$ 3,85°

Абсолютная погрешность измерений по постоянному току Keysight B2912A [5] составляет 3,25 нА, при том, что фактические токи потребления по цепям питания годных кристаллов по цепям питания находятся в диапазоне 1... 10 мкА, а максимальное значение тока не должно превышать 100 мА. Погрешности измерения остальных характеристик СВЧ-модулей определяются погрешностью измерения  $S$ -параметров на векторном анализаторе цепей (таблица 1) [1, 2, 3, 4].

Измерительная система сохраняет  $S$ -матрицы состояний модуля в файл. Рассчитанные на основе  $S$ -параметров характеристики, токи потребления по цепям управления, координаты кристаллов на пластине записываются в таблицу \*.xlsx. Измеряемый

диапазон значений  $S$ -параметров в линейном масштабе от тысячных до тысяч, для того чтобы обеспечить минимальный размер файла без потери точности, выбран следующий формат представления комплексных чисел модуль-дБ, фаза-градусы, количество знаков после запятой 2, количество частот сведено к минимуму с помощью сегментированной развёртки. В данном случае уменьшение количества точек оправданно, так как коэффициенты передачи и отражения являются плавными функциями частоты и определяются конструкцией МИС, что позволяет в случае необходимости интерполировать значения. За счет описанных выше решений удалось уменьшить размер файлов, описывающих пластину, в 10 раз относительно проекта заказчика.

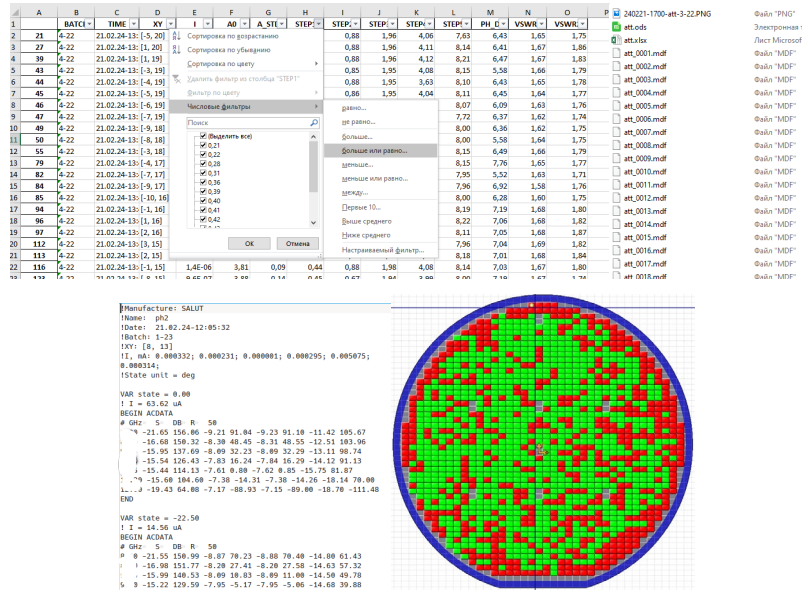


Рисунок 2. Пример хранения данных о пластине.

Современные САПР и измерительные приборы поддерживают большое количество файлов для обмена данными, исходя из задачи была выбрана разновидность формата Generalized Measurement Data Interchange Format (\*.mdf), которая объединяет несколько 2-портовых матриц рассеяния в зависимости от переменной. Для испытуемых МИС СВЧ значения переменных — это состояния из таблицы истинности. Такое решение позволило автоматически подгружать большие объёмы данных в САПР разработчика, для коррекции проекта.

### 3. Блок управления

Далее на примере 4-битного фазовращателя рассмотрен принцип работы и конструкция блока управления в автоматизированной системы тестирования СВЧ-модулей.

Несмотря на обилие различных цифровых модулей управления и источников питания, в соответствии с требованиями технического задания, встал вопрос одновременного измерения тока потребления по цепям управления не превышающем 0,5 мА и конвертации ТТЛ уровней 0/5 В в негативную логику –5/0 В. Задача была решена при помощи блока управления (рисунок 3) на основе аналогового КМОП мультиплекторов серии КР561КП5 (аналог CD4053В [6, 7]), состоящего из трёх аналоговых ключей, и прецизионного измерительного источника Keysight B2912А [5].

При подаче 0 В на вход S1 мультиплектора ключ коммутирует управляющий вход Упр1 фазовращателя к выходу прецизионного измерительного источника B2912А (рисунок 3), с которого подается напряжение – 5 В, что соответствует логическому 0 в негативной логике. При подаче 5 В на вход S1 мультиплектора ключ коммутирует

управляющий вход Упр1 фазовращателя на землю с потенциалом 0 В, что соответствует логической 1 в негативной логике. Аналогично для остальных каналов управления. Управляющие ТТЛ сигналы подаются с цифрового GPIO интерфейса на задней панели источника В2912А. Задание управляющих кодовых последовательностей, измерение токов и напряжений в цепях питания, и синхронизация источника с анализатором цепей и зондовой осуществляются программно по LAN интерфейсу с помощью SCPI-команд. Во время испытаний максимально зарегистрированный автором ток потребления по цепям управления не превышал 2 мкА погрешностью  $\pm (0,025 \% + 1,5 \text{ нА})$  при подаче логических нулей  $-5 \text{ В}$  на все входы фазовращателя. Сопротивление открытого аналогового ключа составляет порядка 100 Ом, а сопротивление цепи затвора полевого транзистора 1 МОм, следовательно, погрешностью вносимой оснасткой можно пренебречь.

Блок управления (рисунок 3) состоит из четырёх микросхем КР1561КП5, AC/DC преобразователей и RC-фильтров питания. Позволяет управлять и измерять токи потребления для МИС с 10-битным управлением, совместим с низкочастотными зондами производства НИИПП.

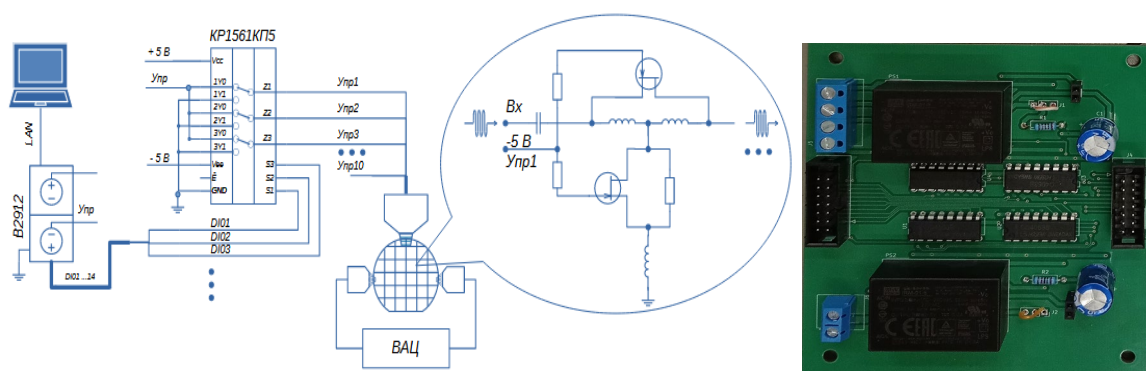


Рисунок 3. Внешний вид модуля управления и схема поясняющая принцип его работы на примере ячейки фазовращателя.

#### 4. ПО на языке Python

Python – это объектно-ориентированный, интерпретируемый и высокоуровневый язык с простым синтаксисом, мощными функциями и большим количеством библиотек, расширяющих его функционал. Позволяет быстро создавать сложные, удобочитаемые приложения минимальными усилиями. Python свободно распространяемый язык с открытым исходным кодом. Язык стандартизирован, что гарантирует стабильную работу приложений.

При написании ПО для автоматизированной системы были использованы библиотеки: *NumPy* – базовый пакет для научных вычислений; *SciPy* – набор математических функций и алгоритмов; *Matplotlib* – библиотека визуализации данных; *Pandas* – библиотека работы с чистовыми таблицами; *pyvisa* – Python оболочка для работы с драйверами измерительных приборов; *SentioProberControl* – библиотека управления зондовой станцией МРІ. За счет использования Python с набором библиотек удалось в течение полугода написать ПО для автоматизации измерений и разбраковки кристалла.

#### Список литературы

1. Keysight [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.keysight.com/>
2. Rohde & Schwarz [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.rohde-schwarz.com/>
3. Планар [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://planarchel.ru/>
4. Микран [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.micran.ru/>

5. Datasheet, B2900B/B2900BL Series Precision Source/Measure Unit // Keysight Technologies, 2020 – 2022, USA, November 8, 2022, 3120-1466.EN.
6. Application note G007, MGS Series Monolithic GaAs Switches // Hewlett Packard, 1992.
7. Datasheet, CD405xB CMOS Single 8-Channel Analog Multiplexer/Demultiplexer with Logic-Level Conversion // Texas Instruments, August 1998.
8. python [электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.python.org/>.
9. NumPy — Documentation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://numpy.org/doc/stable/user/whatisnumpy.html>