

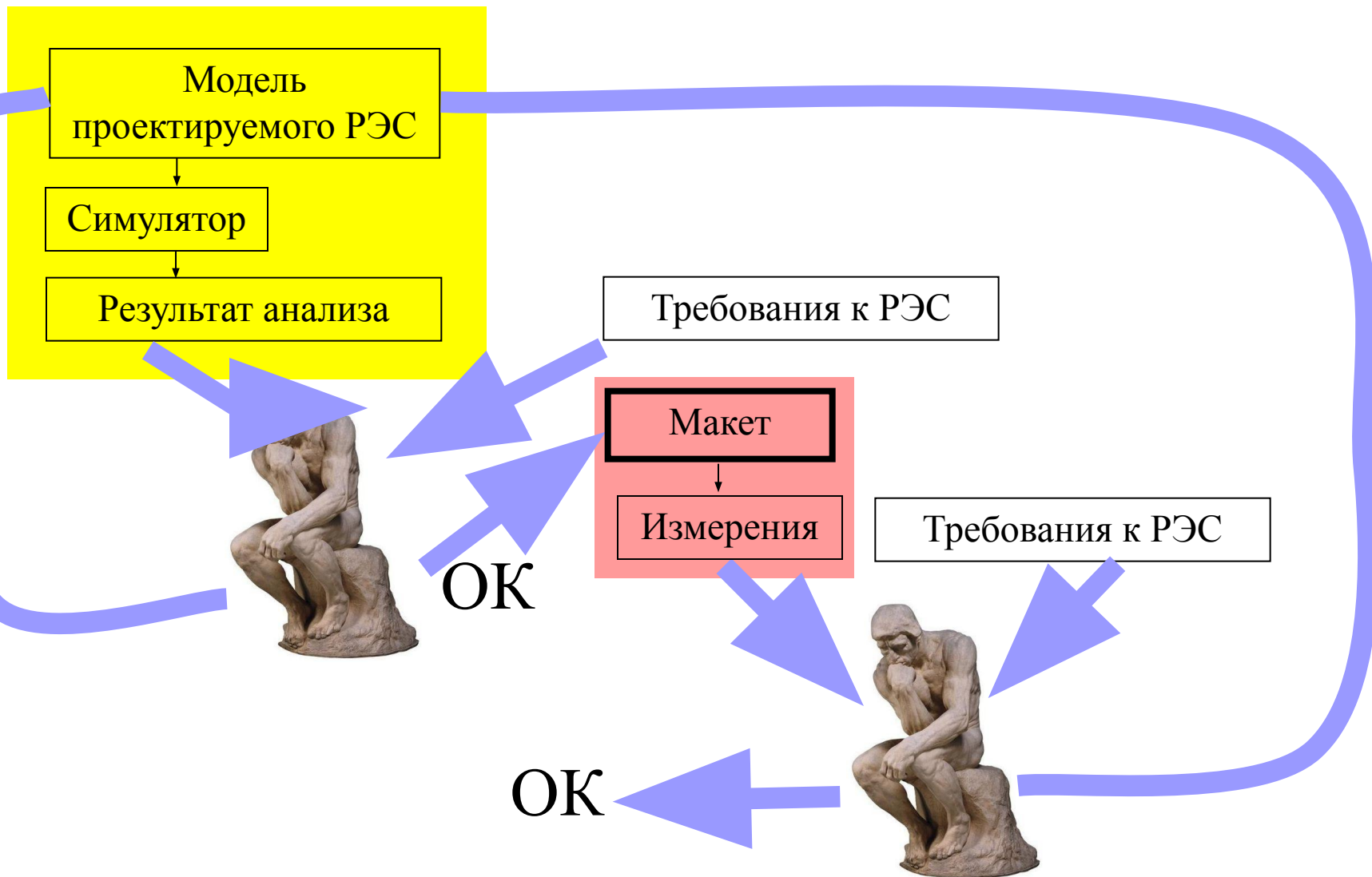


**Э.В. Семенов**

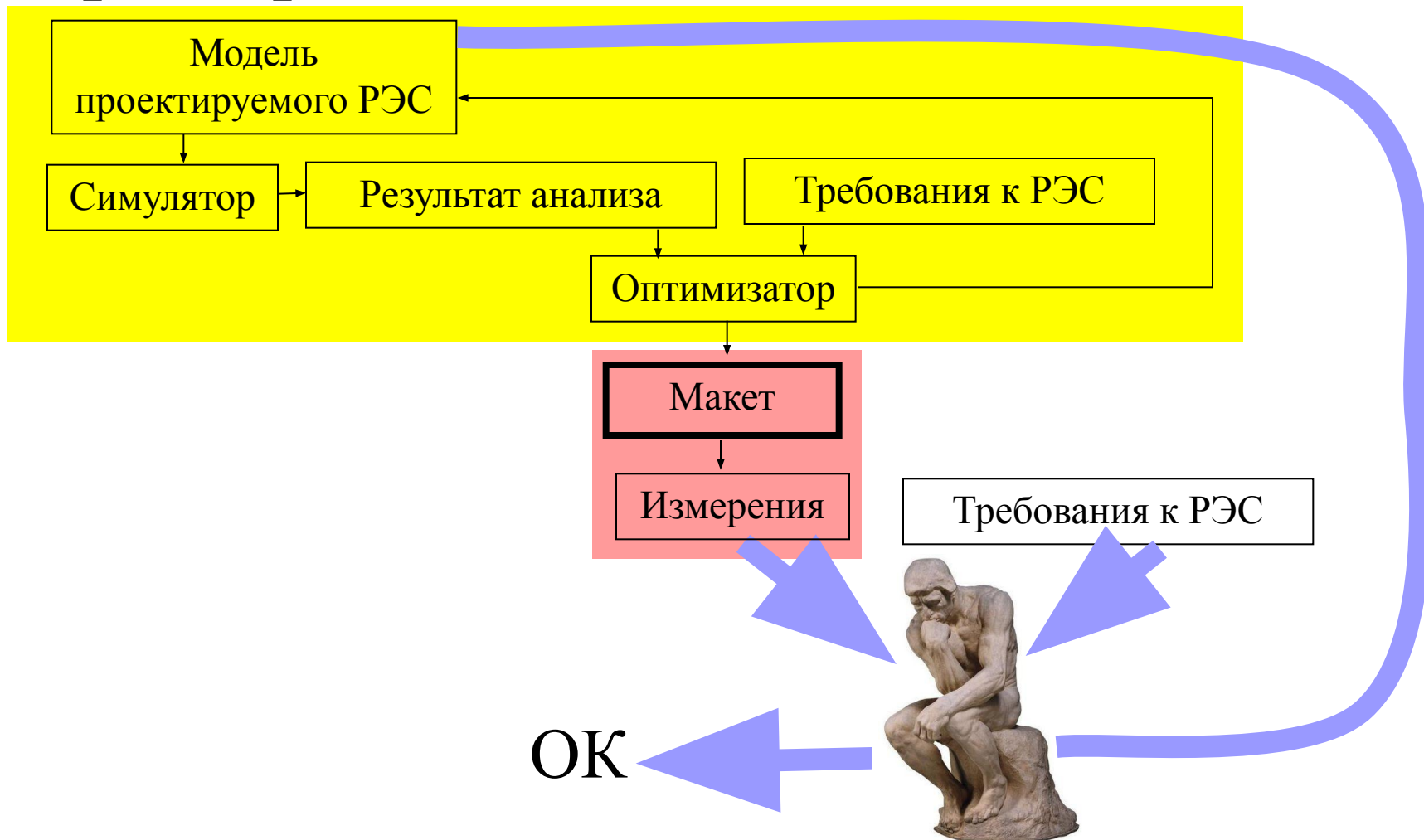
**ОСНОВЫ  
КОМПЬЮТЕРНОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
РЭС**

**Раздел 5. Расчетно-  
экспериментальные методы  
проектирования. Интегрированные  
системы моделирования и  
измерений**

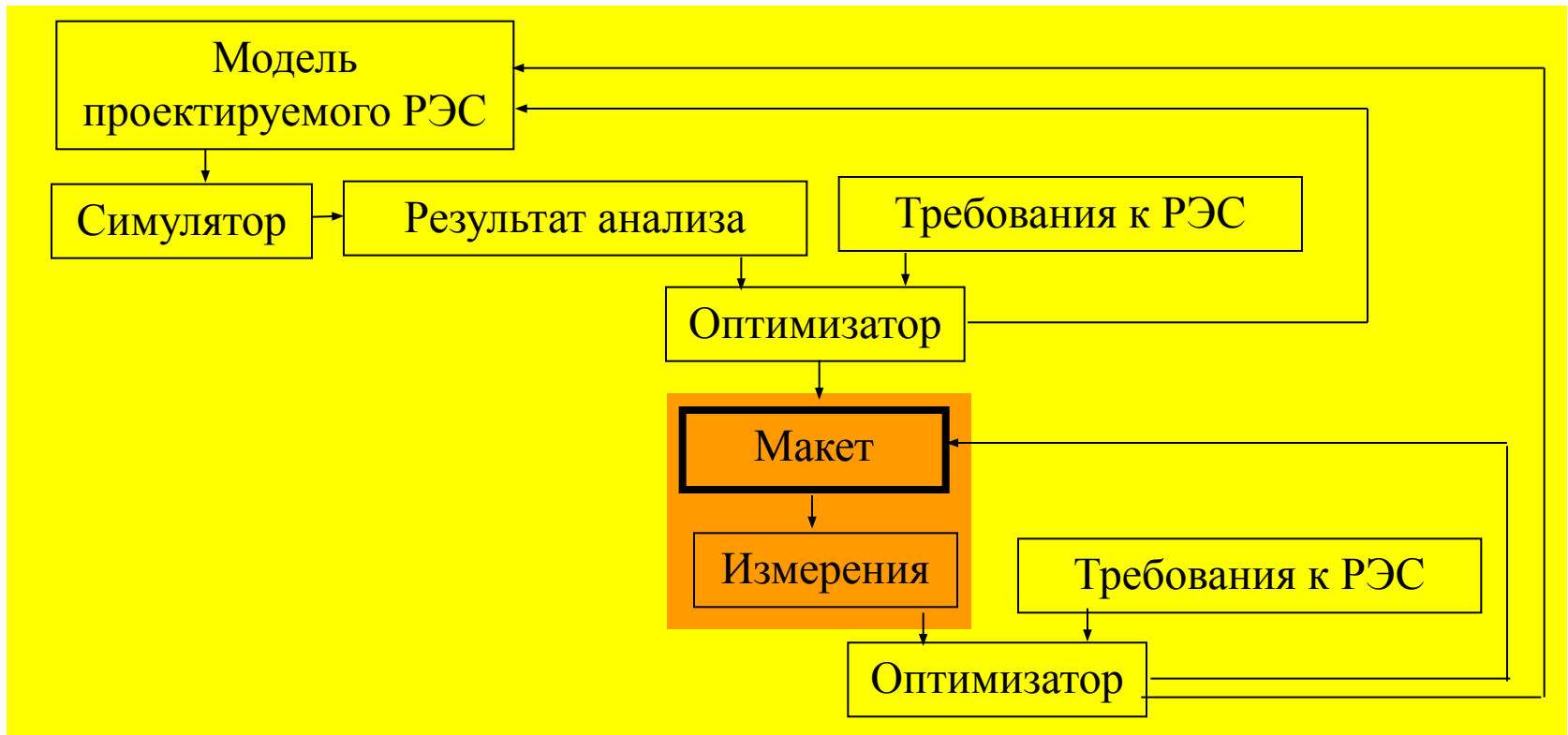
# Первые системы автоматизированного анализа РЭС



# Системы проектирования с использованием автоматизированного параметрического синтеза



# Автоматизированный расчетно-экспериментальный метод проектирования



# Преимущества расчетно-экспериментального метода проектирования

- Сокращение участия человека в процессе проектирования.
- Уменьшение времени проектирования за счет реализации моделирования и измерений на единой программно-аппаратной платформе.
- Формирование единого «гибридного» пространства варьируемых параметров, в котором одновременно могут варьироваться как параметры самого макета, так и его модели.
- Стимулирование творческого потенциала инженера за счет отображения расчетных и экспериментальных графиков в режиме «online» на одном поле.

# Краткая сущность расчетно-экспериментального метода

- Параметры и характеристики РЭС рассчитываются обычным образом исходя из его модели.
- Изготавливается макет.
- Параметры и характеристики модели корректируются таким образом, чтобы модель наилучшим образом отображала параметры макета.
- Параметры откорректированной, «хорошей» модели подстраиваются так, чтобы удовлетворить технические требования к РЭС.
- Вновь изготавливается макет по «хорошей» модели. Вероятность того, что его параметры будут близки к требуемым достаточно высока.

# На чем основаны преимущества расчетно-экспериментального метода?

- Источник преимуществ расчетно-экспериментального метода: низкое качество обычных моделей, которые получены в другом месте, в другое время, на другом оборудовании и, главное, на других тестовых сигналах.
- На основе интегрированных систем моделирования и измерений можно реализовать процедуру получения моделей для собственного использования, которые будут работать для узкого класса сигналов, но очень хорошо.

# Аппаратное обеспечение расчетно-экспериментального метода проектирования

- Для реализации расчетно-экспериментального метода необходим набор автоматически управляемых измерительных приборов.
- В принципе это может быть набор самых обычных приборов с управлением от компьютера.



# Гибкие измерительные платформы на базе интерфейса PXI и пакета программ LabVIEW

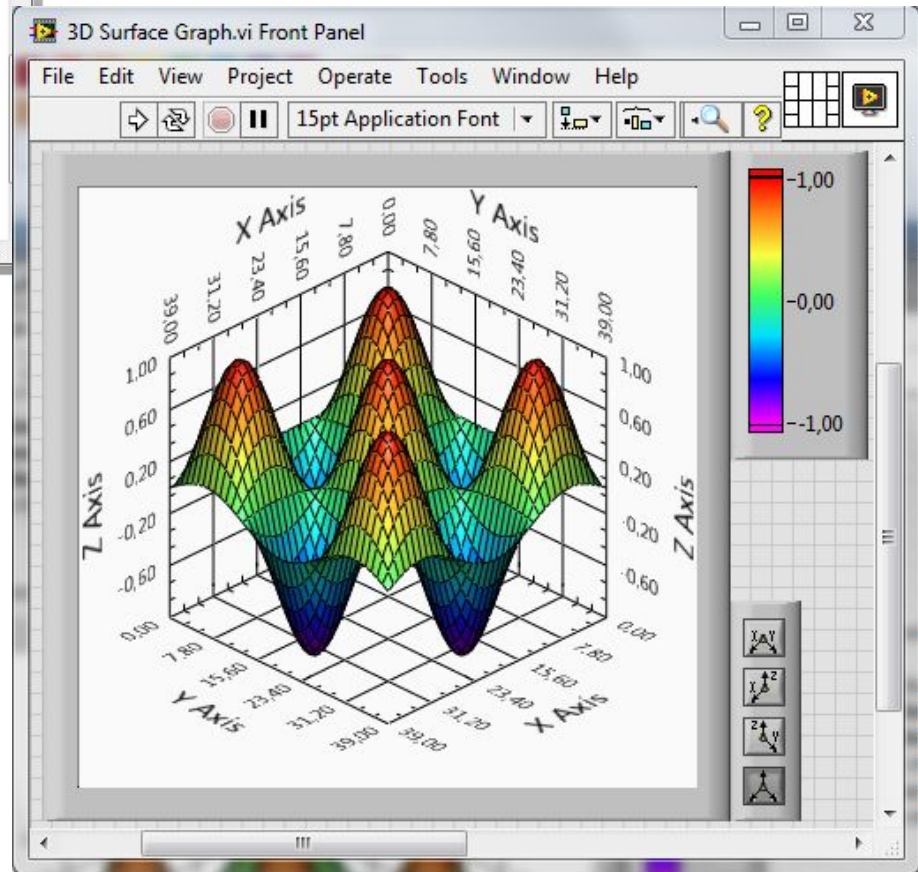
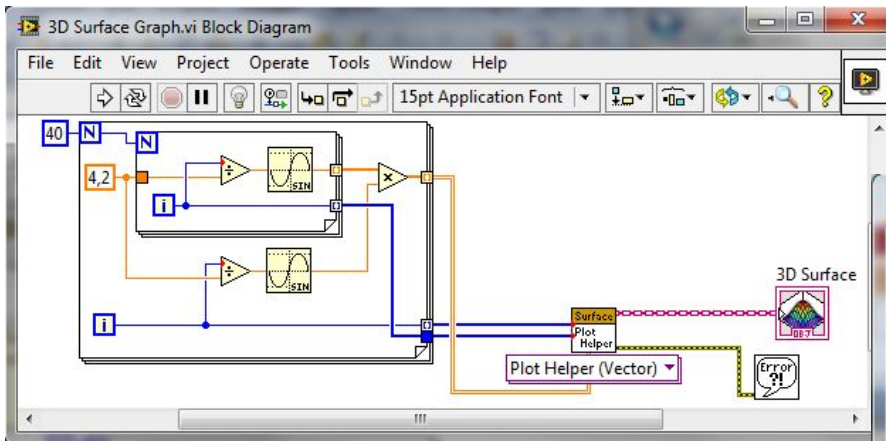
- Лучше всего интегрируются между собой и с компьютером модульные измерительные приборы на базе крейтовых систем.
- Наибольшее распространение получили модульные приборы с использованием шин PXI и LXI.
- Для систем небольшого масштаба лучше подходит шина PXI.

Модульные приборы

PXI-шасси

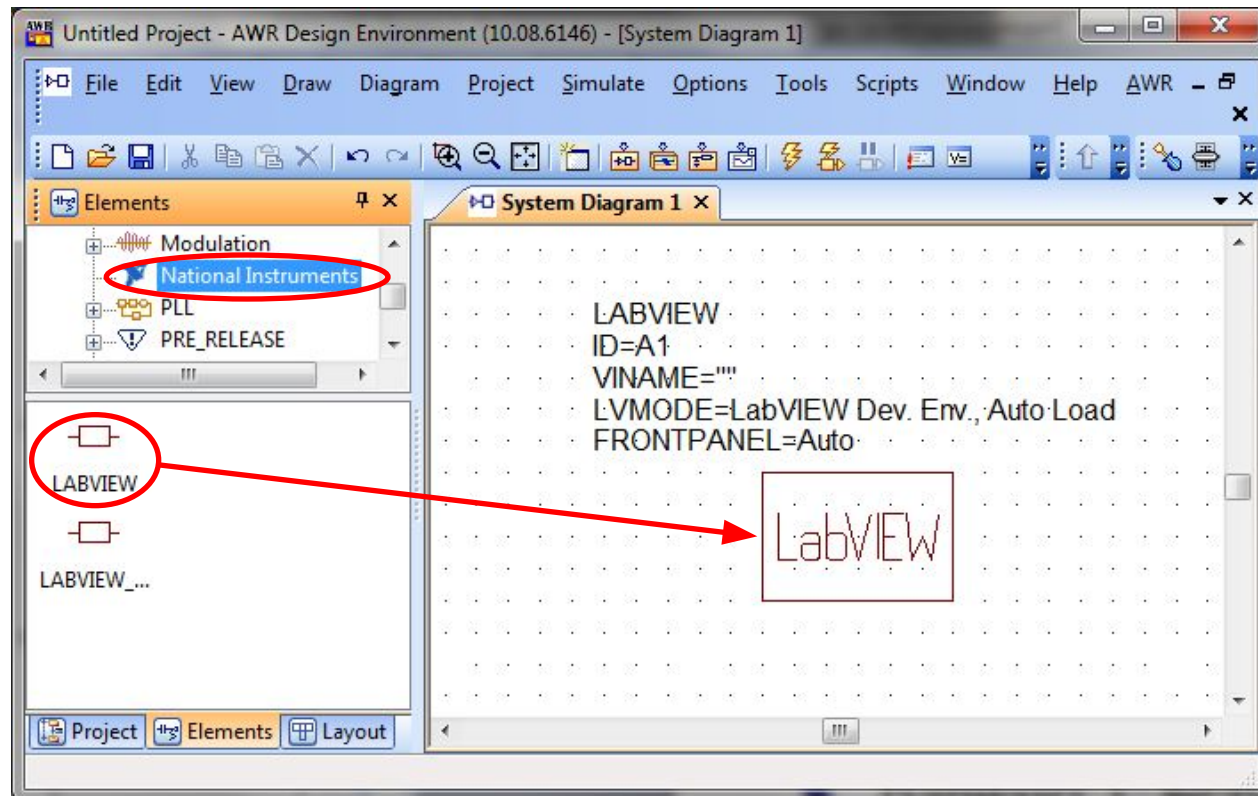


# LabVIEW – стандартная среда для управления РХИ-приборами



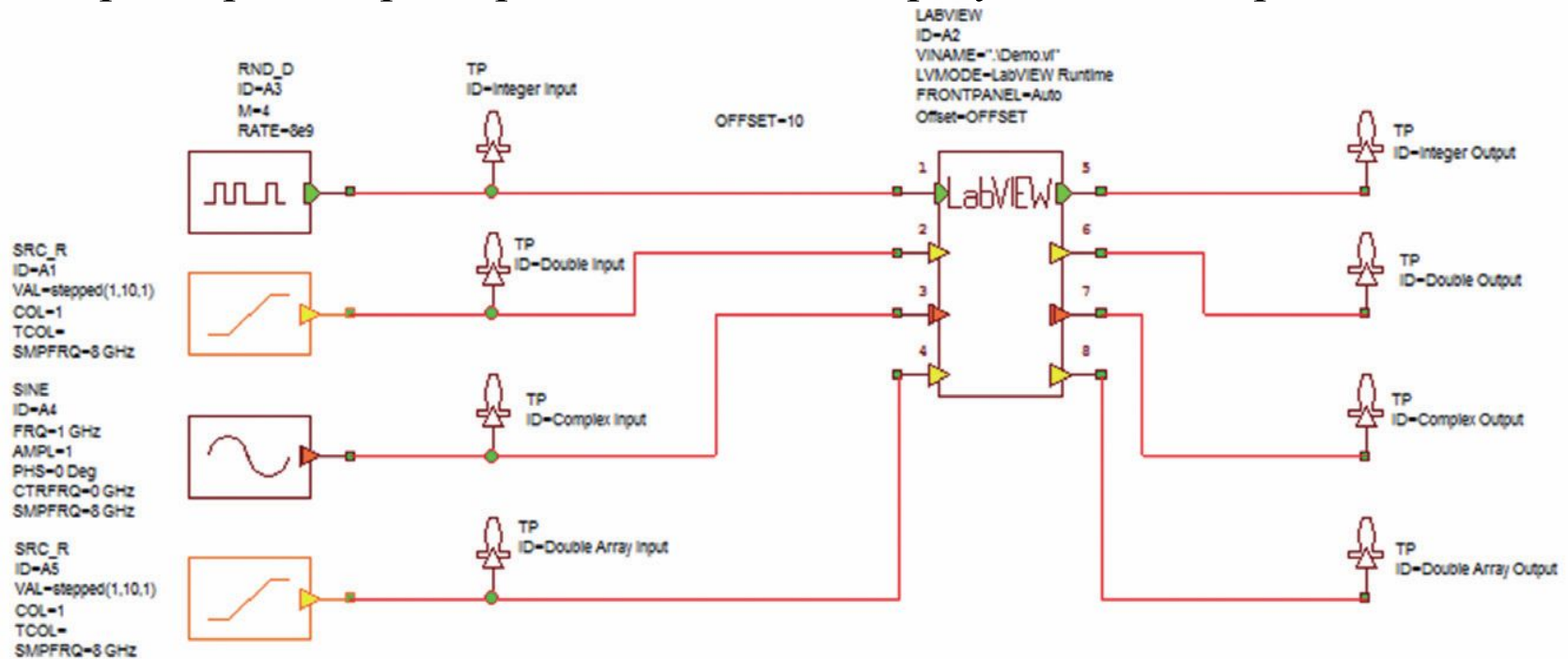
Так выглядит программа на языке LabVIEW

# Интеграция измерительных систем (LabVIEW) с системами моделирования (AWRDE)



# Интеграция измерительных систем (LabVIEW) с системами моделирования (AWRDE)

- Для вызываемого виртуального прибора AWRDE задает входные параметры и характеристики и снимает результаты измерения:

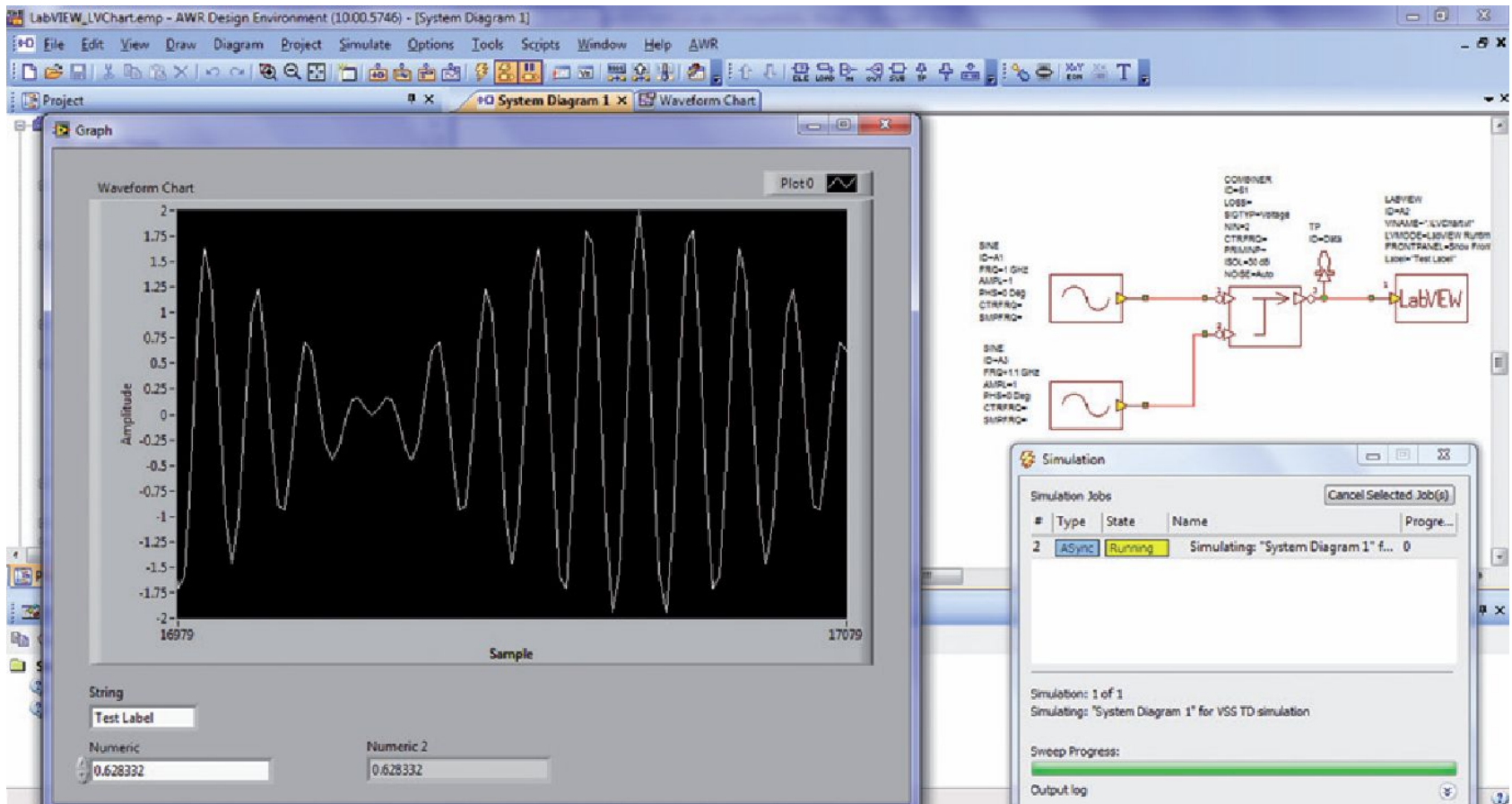


# Интеграция измерительных систем (LabVIEW) с системами моделирования (AWRDE)

- Основной интерфейсной средой может быть либо AWRDE, либо LabVIEW.
- В первом случае с контрольных точек (на предыдущем рисунке справа) можно строить графики средствами AWRDE, которые будут отображать результаты измерения на реальном макете. На тот же график можно вывести результаты расчетов по модели РЭС в САПР.

# Интеграция измерительных систем (LabVIEW) с системами моделирования (AWRDE)

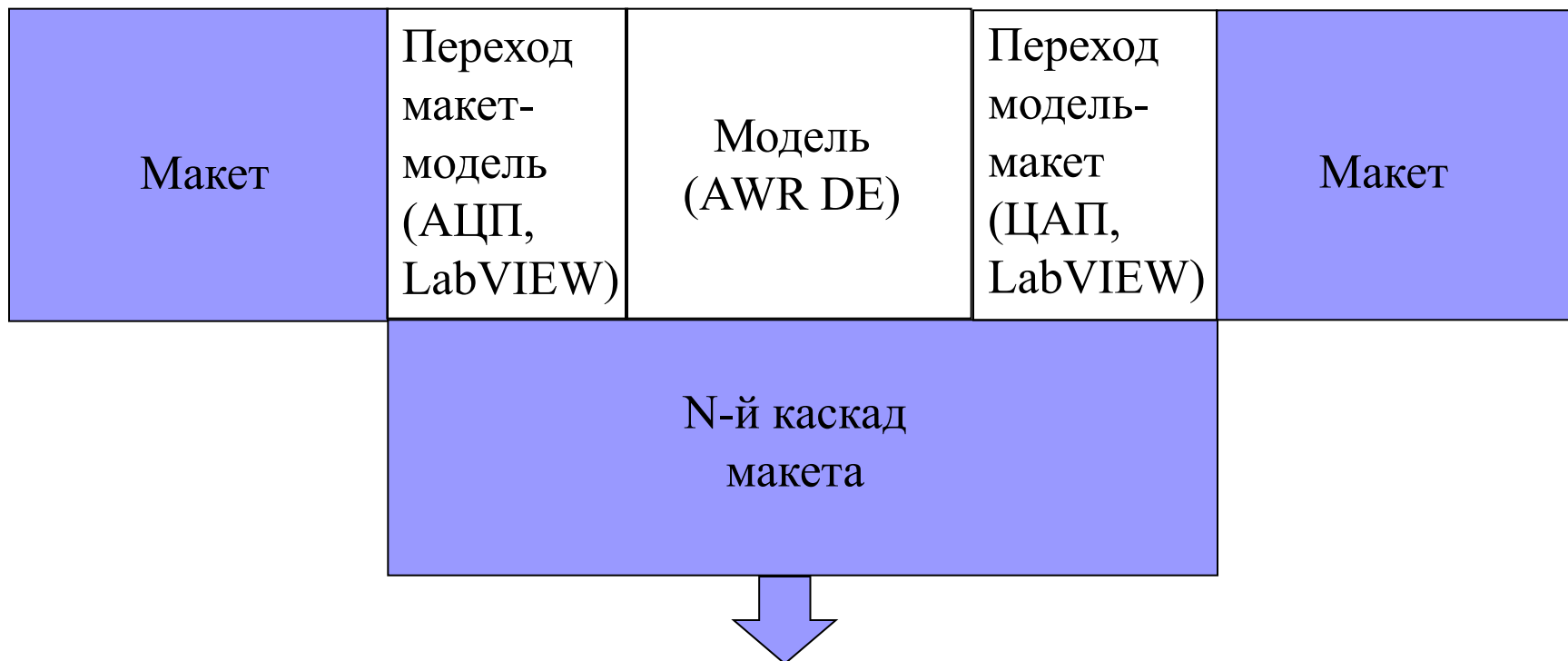
- Второй вариант: для совместного отображения расчетных и экспериментальных графиков можно использовать LabVIEW:



# Возможная стратегия применения интегрированных систем измерения и моделирования

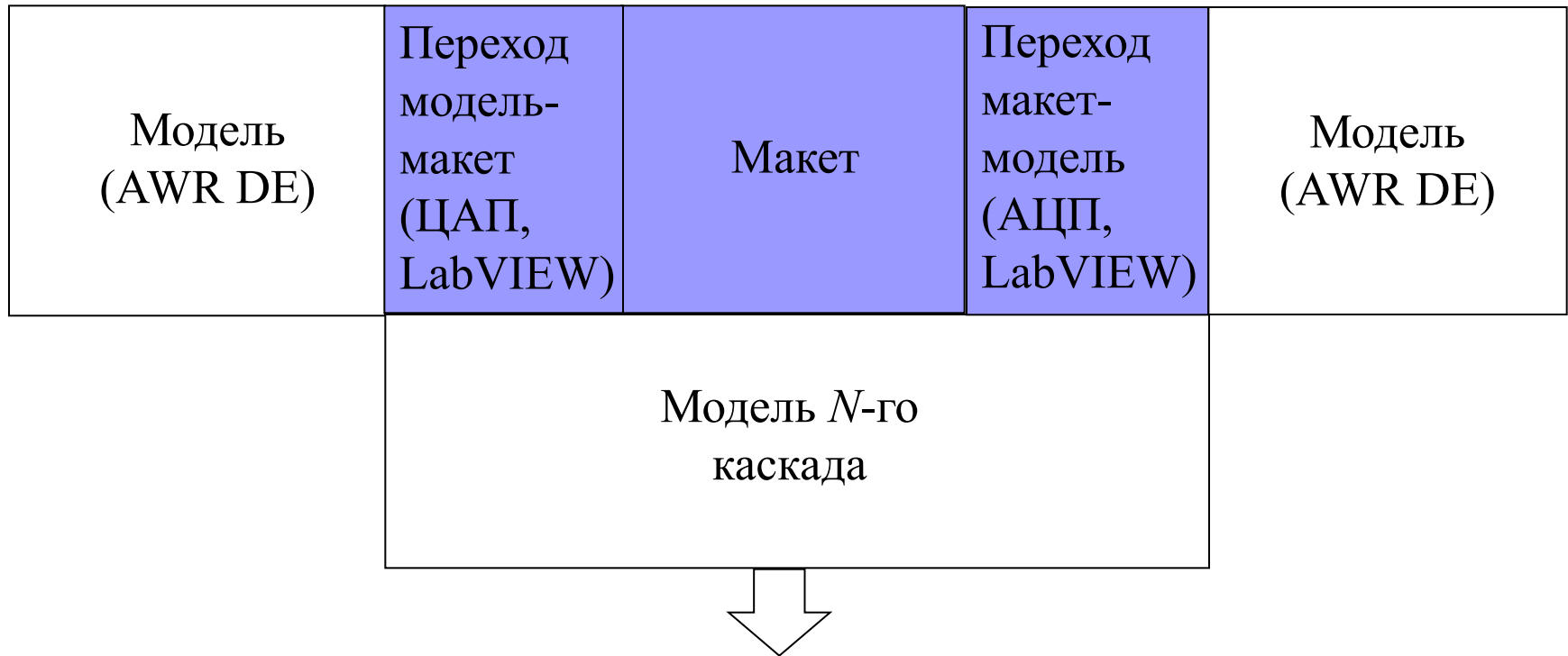
- Построение модели проектируемого устройства (например, принципиальной схемы) с использованием «стандартных» моделей.
- Определение формы, амплитуды и других параметров сигналов, воздействующих на ключевые элементы (например, транзисторы) в данной схеме.
- Измерение характеристик ключевых элементов при определенных воздействиях на них и экстракция параметров их моделей на этой основе.
- Замена в модели проектируемого устройства «стандартных» моделей на уточненные.

# Второй путь интеграции систем моделирования и измерений – замена отдельных каскадов их моделями





# Или наоборот



- Сущность обоих вариантов: сочетание декомпозиционного подхода с моделированием на реальных сигналах.

# Системы экстракции параметров моделей

- Промежуточное положение между системами измерений и моделирования занимают также системы экстракции параметров моделей.
- Задача таких систем – по результатам измерения характеристик какого либо элемента или системы (диода, транзистора, конденсатора, резистора) определить параметры модели этого элемента.
- Налицо совокупность задач измерения и моделирования.

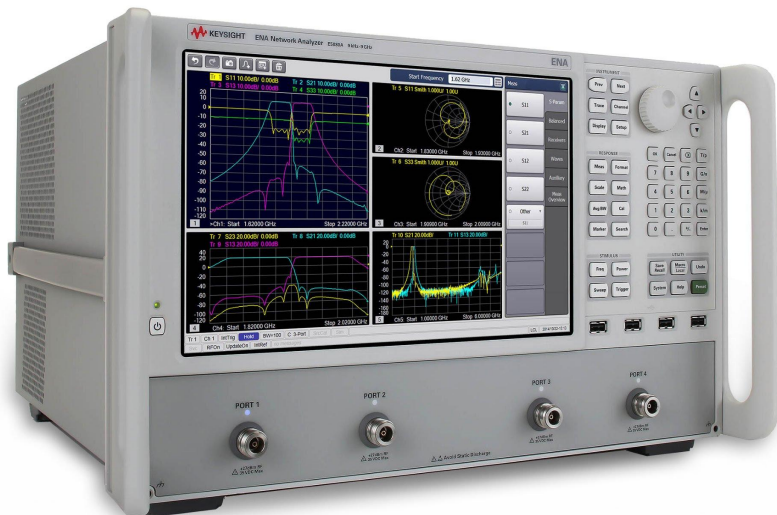
# Экстракция параметров линейных моделей

- Средства экстракции параметров моделей делятся на:
  - линейные;
  - нелинейные.
- Экстракция параметров линейных моделей (двухполюсников, четырехполюсников, многополюсников) осуществляется при помощи векторных измерителей характеристик цепей (Vector Network Analyzer, VNA).

# Векторные измерители характеристик цепей

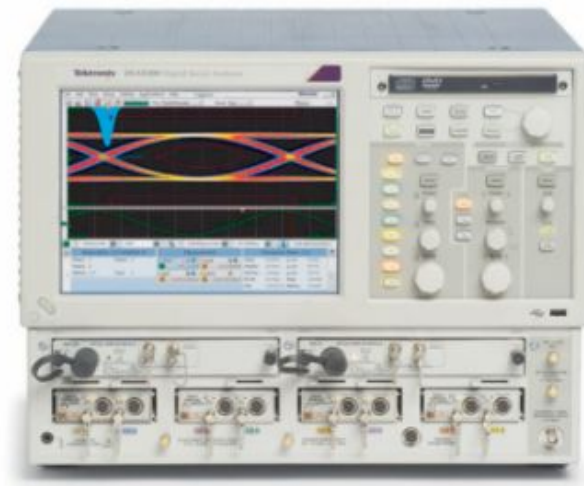
- Классифицируются по виду тестового сигнала:
  - с использованием частотного свипа;
  - с использованием шумовых сверхширокополосных сигналов;
  - с использованием короткоимпульсных сигналов (рефлектометры с преобразованием Фурье).

# Примеры векторных измерителей характеристик цепей



- С частотным свипом Keysight E5080A

- С СШП тестовыми сигналами Keysight N7081A



- Рефлектометр с преобразованием Фурье



# Результат экстракции параметров линейной модели транзистора (пример)

- Файл формата s2p –  
таблица S-параметров для  
заданной схемы  
включения (общий  
эмиттер) и рабочей точки  
( $u_{кЭ} = 4 \text{ В}$ ,  $i_{к} = 40 \text{ мА}$ ) +  
таблица шумовых  
параметров.

BFR540E.s2p — Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

! Bias condition: Vce=4V, Ic=40mA  
!  
# MHz S MA R 50  
! Freq S11 S21 S12 S22 !GUM [dB]  
800 .305 -177.9 4.694 79.6 .123 72.5 .156 -66.8 ! 14.0  
900 .306 177.7 4.197 77.2 .137 72.1 .152 -67.0 ! 13.0  
1000 .307 173.5 3.799 74.9 .151 71.5 .145 -67.9 ! 12.1  
1200 .315 166.5 3.210 70.7 .179 70.2 .137 -71.7 ! 10.7  
1400 .322 161.9 2.802 66.6 .206 68.7 .133 -76.3 ! 9.5  
1600 .312 157.7 2.496 62.5 .232 67.3 .135 -76.7 ! 8.5  
1800 .313 152.1 2.261 59.0 .258 65.7 .133 -78.8 ! 7.6  
2000 .325 144.7 2.079 55.5 .284 63.9 .119 -80.9 ! 6.9  
2200 .349 139.5 1.928 52.6 .309 62.5 .101 -88.9 ! 6.3  
2400 .367 137.2 1.806 49.2 .333 60.5 .097 -103.2 ! 5.8  
2600 .367 136.0 1.691 46.0 .354 58.7 .106 -113.4 ! 5.2  
2800 .365 132.0 1.621 43.1 .378 57.0 .110 -116.3 ! 4.9  
3000 .381 125.1 1.553 40.2 .400 55.2 .098 -120.8 ! 4.5  
! Noise data:  
! Freq. Fmin Gamma-opt m  
900 1.90 .279 180.0 .13  
2000 2.60 .429 -140.0 .22

# Экстракция параметров нелинейных моделей

- Существует два класса инструментальных средств для экстракции параметров моделей нелинейных элементов:
  - для «одночастотных» нелинейных моделей элементов – нелинейные векторные измерители характеристик цепей (Nonlinear Vector Network Analyzer, NVNA);
  - для универсальных (SPICE) моделей – характериографы.

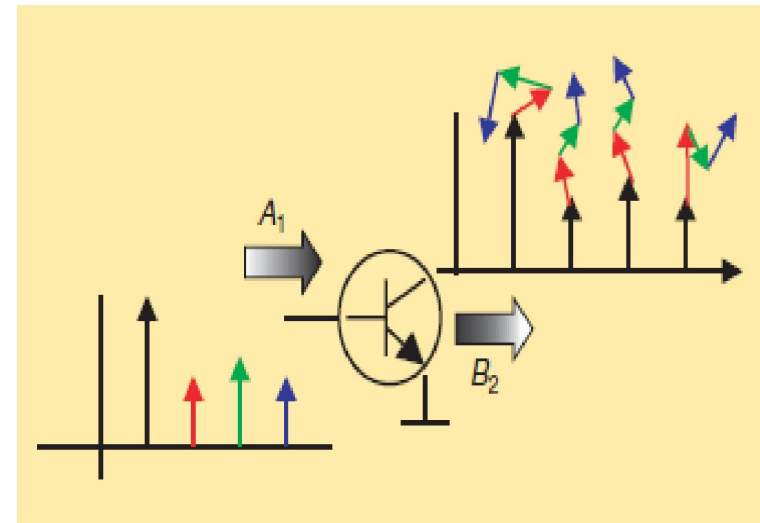
# Нелинейные векторные измерители характеристик цепей

- В принципе их работу можно рассматривать как расширение линейных измерителей характеристик цепей, в которых предусматривается свип не только по частоте, но и по другим параметрам сигналов и нагрузок. Общий перечень свипов:
  - частота тестового сигнала;
  - амплитуда тестового сигнала;
  - сопротивление источника тестового сигнала;
  - сопротивление нагрузки.
- Последние два свипа относят к так называемым load-pull измерениям.
- Систему параметров, которая при этом измеряется, обычно называют X-параметрами.



# X-параметры

- S-параметры – коэффициенты, определяющие передачу спектральной составляющей с некоторой частоты на эту же самую частоту.
- X-параметры – набор коэффициентов, определяющих передачу спектральной составляющей с некоторой частоты на ряд других частот.
- Для каждой конкретной амплитуды входного воздействия выполняется принцип суперпозиции гармоник. Т.е. выходной сигнал представляется как линейная взвешенная сумма входных гармоник.
- X-параметры являются нелинейной моделью только в радиотехнической терминологии. С физико-математической точки зрения это линейная модель для каждого конкретного воздействия.
- Нелинейность учитывается только в том смысле, что коэффициенты передачи зависят от амплитуды воздействия.



Принцип суперпозиции гармоник

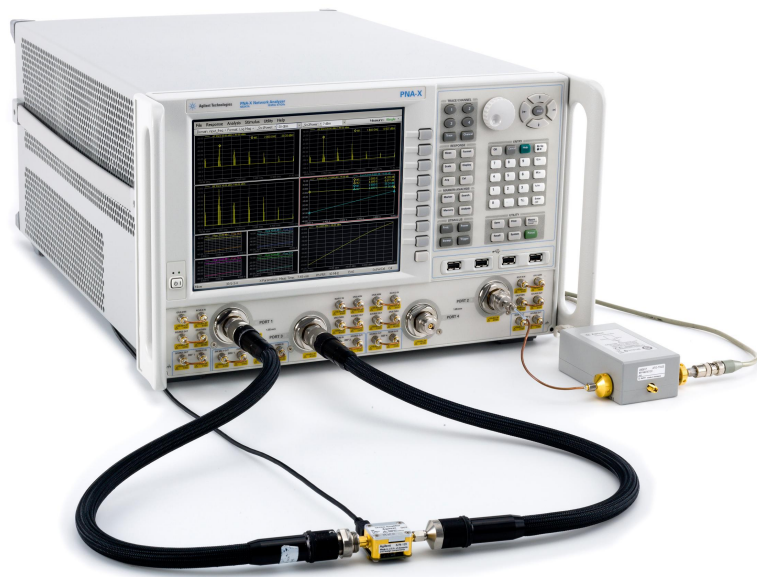
# Измерение $X$ -параметров

- Технически  $X$ -параметры измеряются также, как и  $S$ -параметры, но для каждой амплитуды падающей волны (из дискретного ряда) отдельно.
- Отличие измерителей  $X$ -параметров (нелинейных измерителей характеристик цепей) состоит в наличии системы абсолютной калибровки (с учетом абсолютной мощности тестового сигнала) и фазовых соотношений внутри регистрируемых многочастотных сигналов.

# Load-pull $X$ -параметры

- Коэффициенты в системе  $X$ -параметров зависят не только от амплитуды падающей на объект волны, но и от сопротивления подводящей и отводящей линий.
- Поэтому для получения полной модели нелинейного объекта в системе  $X$ -параметров приходится табулировать коэффициенты матрицы рассеяния для каждого значения (из дискретного ряда) сопротивления нагрузки и источника сигнала.
- Для создания изменяемого сопротивления источника сигнала и нагрузки служат автоматически перестраиваемые устройства – «тюнеры».

# Примеры нелинейных векторных измерителей характеристик цепей



Keysight PNA-X N5274A

Управляемые  
нагрузки «тюнеры»



Load-pull измерительная система на основе Keysight PNA-X N5274A

# Недостатки $X$ -параметров

- $X$ -параметры хороши своей универсальностью: не нужно знать, что вы моделируете – диод, целый усилитель или смеситель.
- Но при табулировании  $X$ -параметров реально учесть зависимость их коэффициентов только от амплитуды первой гармоники и постоянного смещения.
- Поэтому  $X$ -параметры работают только для сигналов близких к гармоническим.
- При произвольном воздействии в настоящее время хорошо работают только модели в виде эквивалентных схем для конкретных элементов.

# Характериографы

- Характериографы используются для измерения характеристик и параметров элементов эквивалентных схем, используемых в SPICE-моделях.
- SPICE-модели – совокупность нелинейных проводимостей (характеризуются ВАХ) и нелинейных емкостей (характеризуются ВФХ).
- Поэтому характериограф – прибор позволяющий измерять ВАХ и ВФХ в рамках принятых эквивалентных схем (например, последовательной или параллельной).

# Принцип действия характерографов

- ВАХ измеряется путем установки различных напряжений на объекте с последующим измерением токов через него.
- ВФХ измеряется двумя способами:
  - на гармоническом сигнале с изменяющимся постоянным смещением;
  - на медленно меняющемся линейно нарастающем сигнале.
- Иногда для исключения саморазогрева объекта (что влияет на ВАХ и ВФХ) ограничивают длительность приложения постоянного напряжения или гармонического сигнала со смещением (так называемые PIV-измерения).

# Пример характернографа



- Keithley 4200

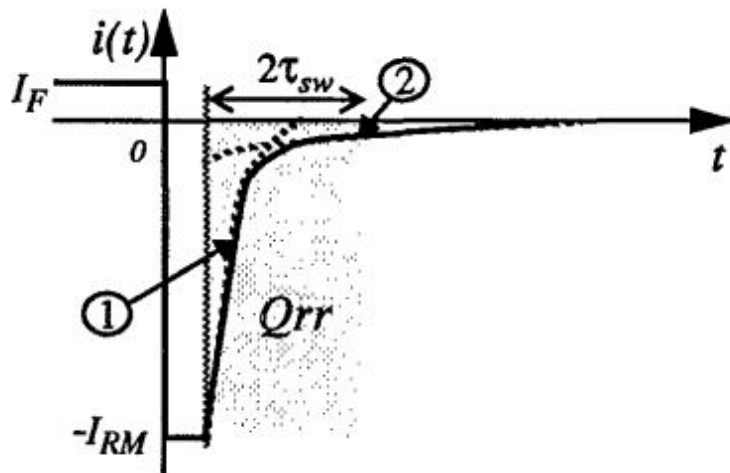


# Недостатки «обычных» характериографов

- Обычные характериографы работают на квазистационарных сигналах (постоянном токе или медленно меняющихся гармонических сигналах).
- Получающиеся модели не учитывают ряд особенностей нелинейных переходных процессов в объектах (например, накопление и рассасывание диффузионного заряда).
- Нелинейность объекта заставляет при измерении емкости выбирать малую амплитуду тестового воздействия. Это приводит к увеличению погрешности измерения, в особенности при наличии тока проводимости через объект.

# Перспективы систем экстракции параметров моделей

- Дальнейшее совершенствование нелинейных моделей связано с разработкой неквазистационарных моделей, адекватно учитывающих нелинейные переходные процессы.
- Соответствующие системы экстракции параметров должны создавать характеристический переходный процесс и измерять нужные характеристики (вольт-кулонную, вольт-фарадную) в этом режиме.



- Нелинейный переходный процесс в диоде после прерывания прямого тока.
- Процесс характеризует двухэтапное рассасывание диффузионного заряда.
- Данное измерение может быть использовано для создания неквазистационарной нелинейной модели диодов и транзисторов, эффективной для переключательных и импульсных схем.