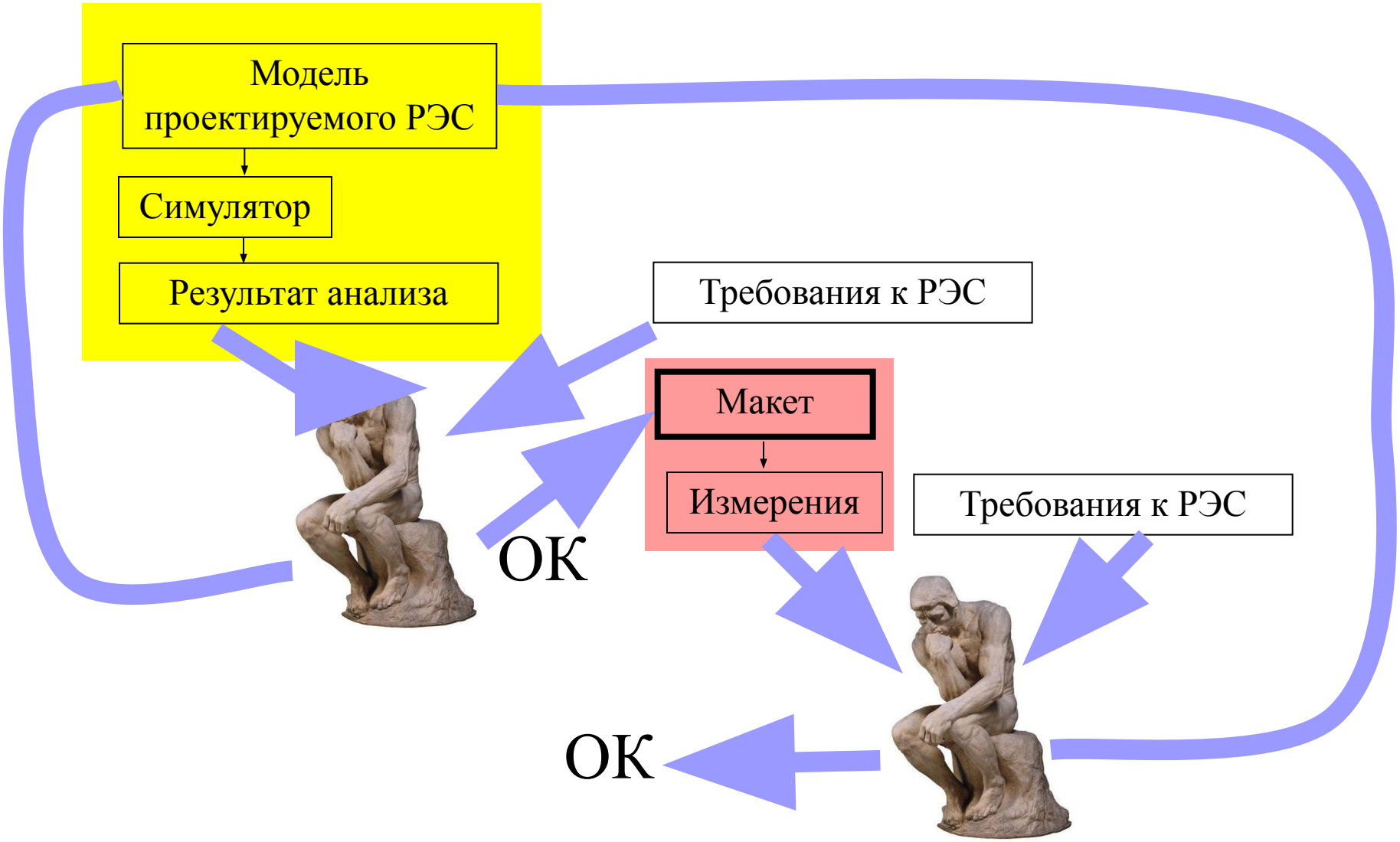
Э.В. Семенов

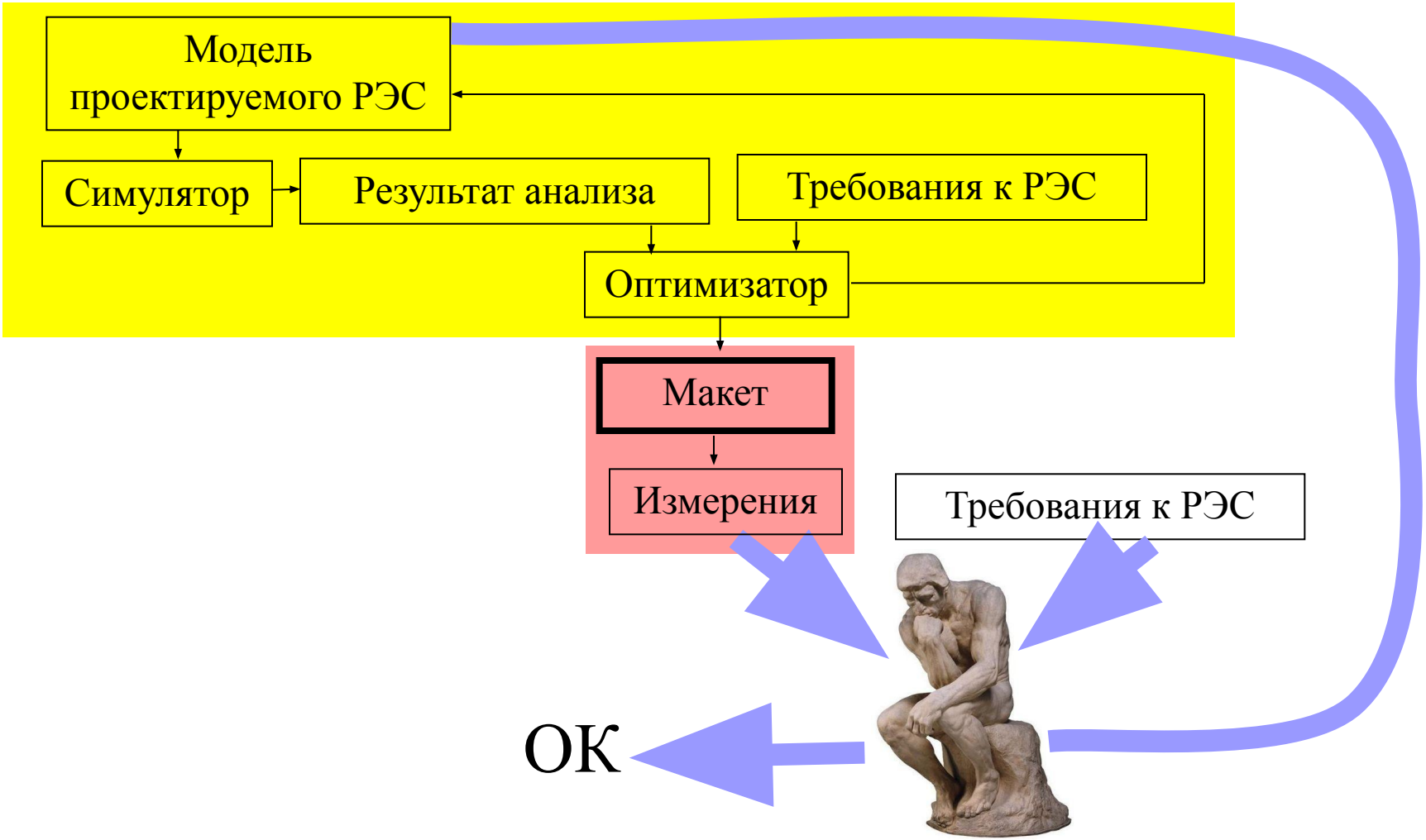
Основы компьютерного проектирования РЭС

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

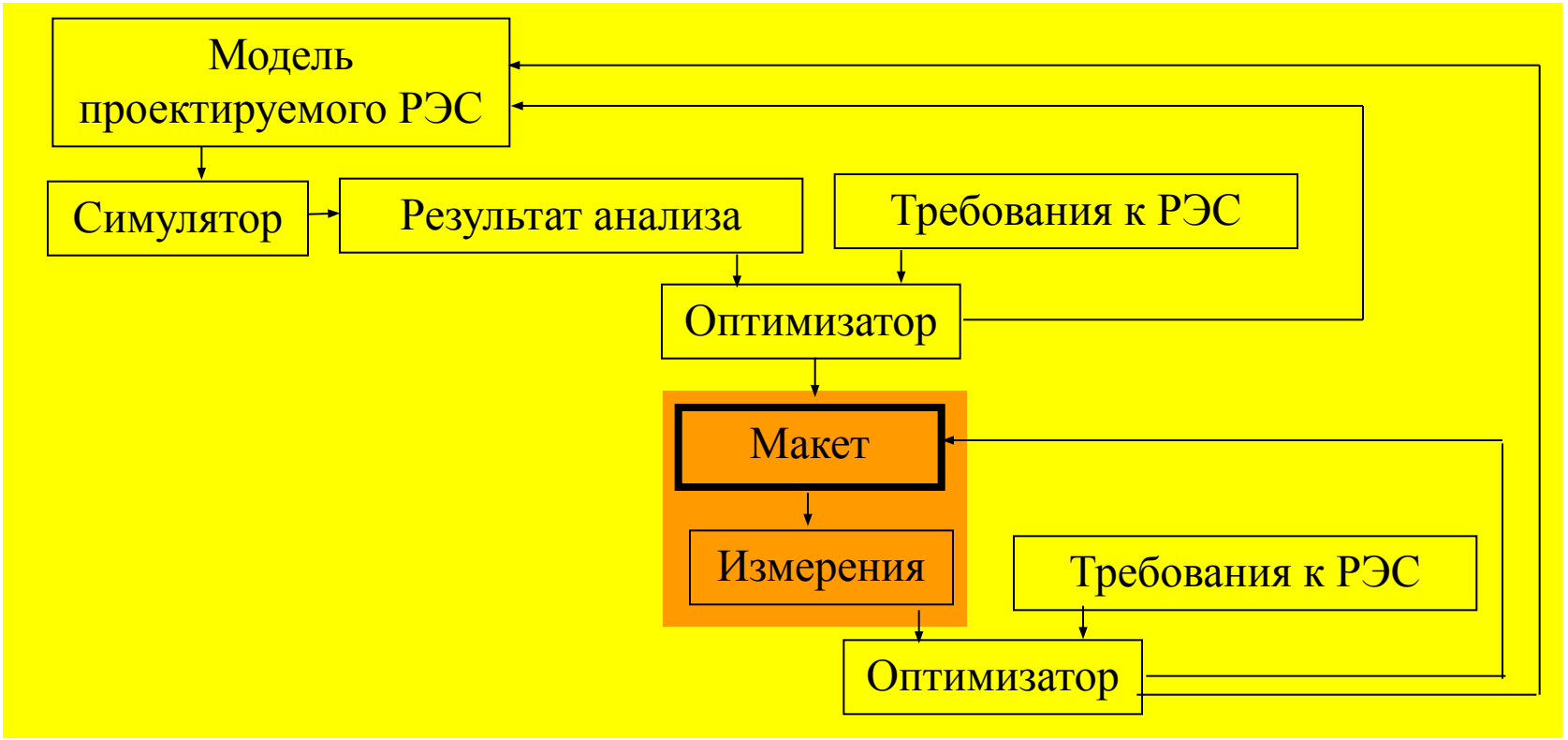
Первые системы автоматизированного анализа РЭС



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.

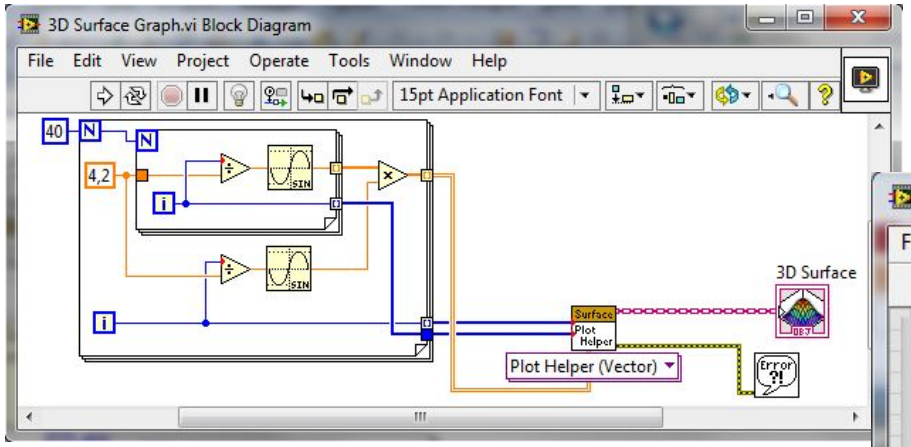
Гибкие измерительные платформы на базе интерфейса PXI и пакета программ LabVIEW

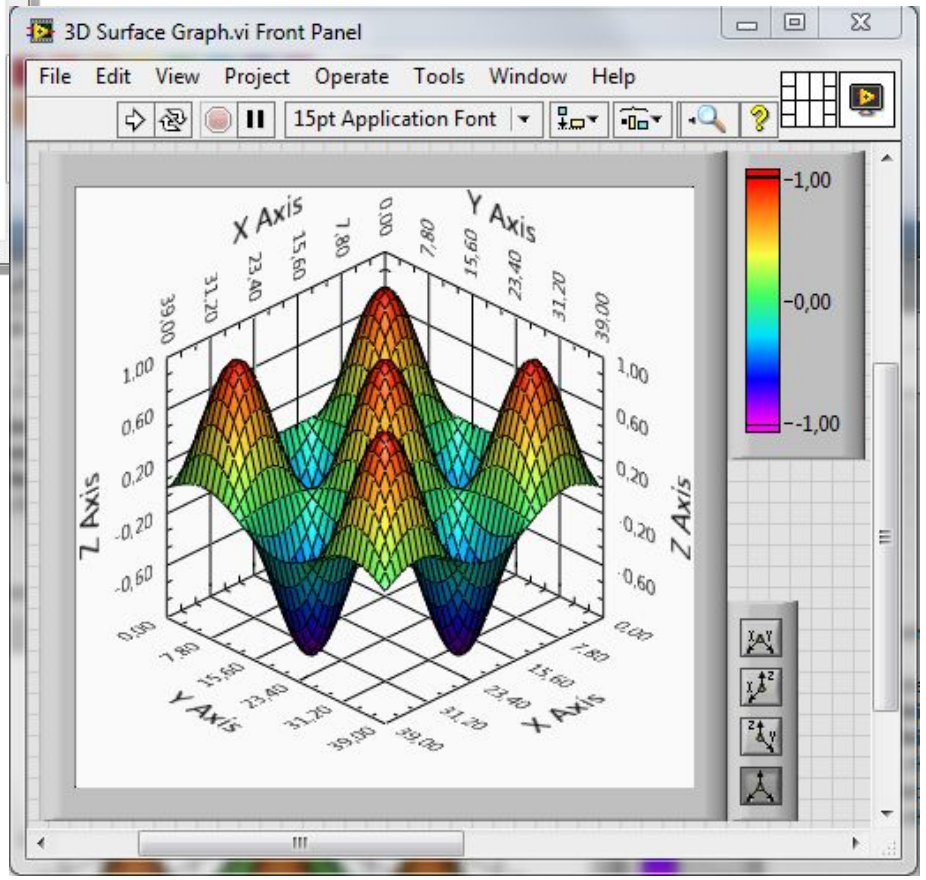
- Лучше всего интегрируются между собой и с компьютером модульные измерительные приборы на базе крейтовых систем.
- Наибольшее распространение получили модульные приборы с использованием шин PXI и LXI.
- Для систем небольшого масштаба лучше подходит шина PXI.

Модульные приборы

´PXI-шасси

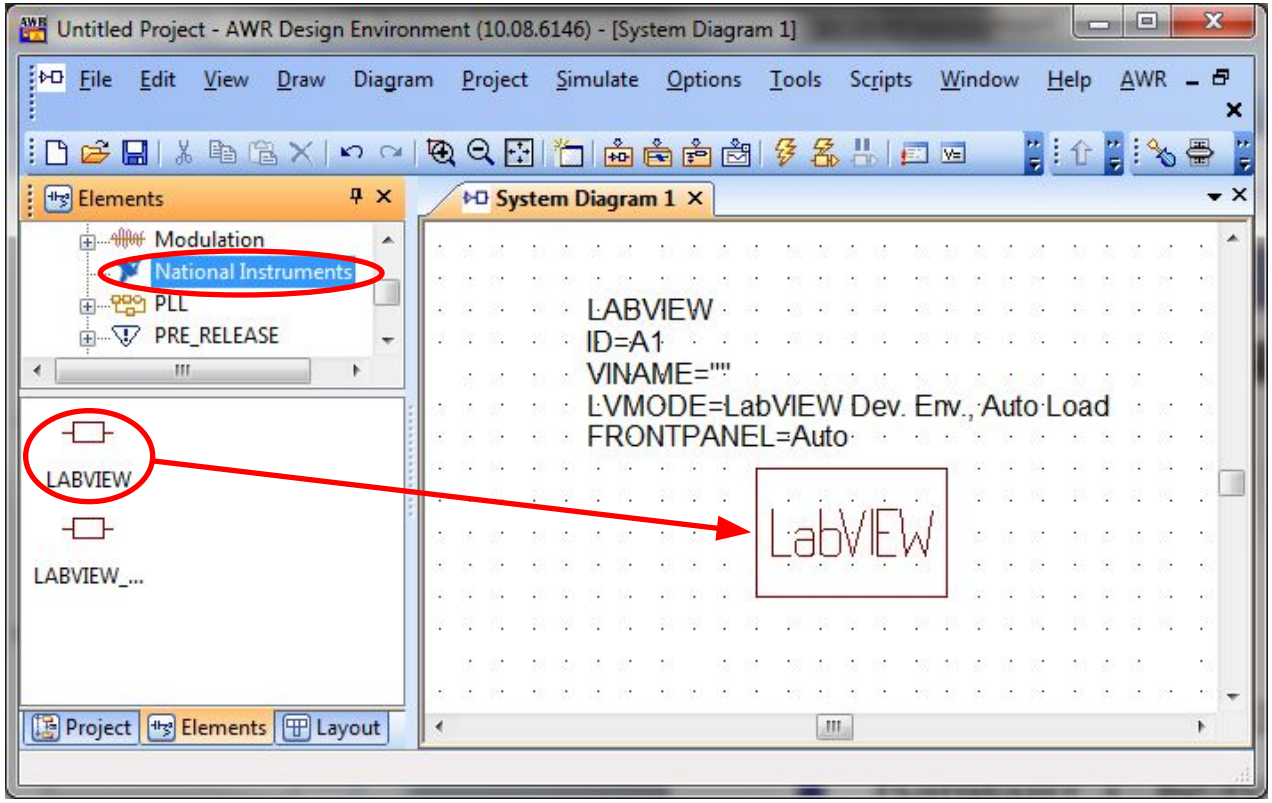
LabVIEW – стандартная среда для управления PXI-приборами





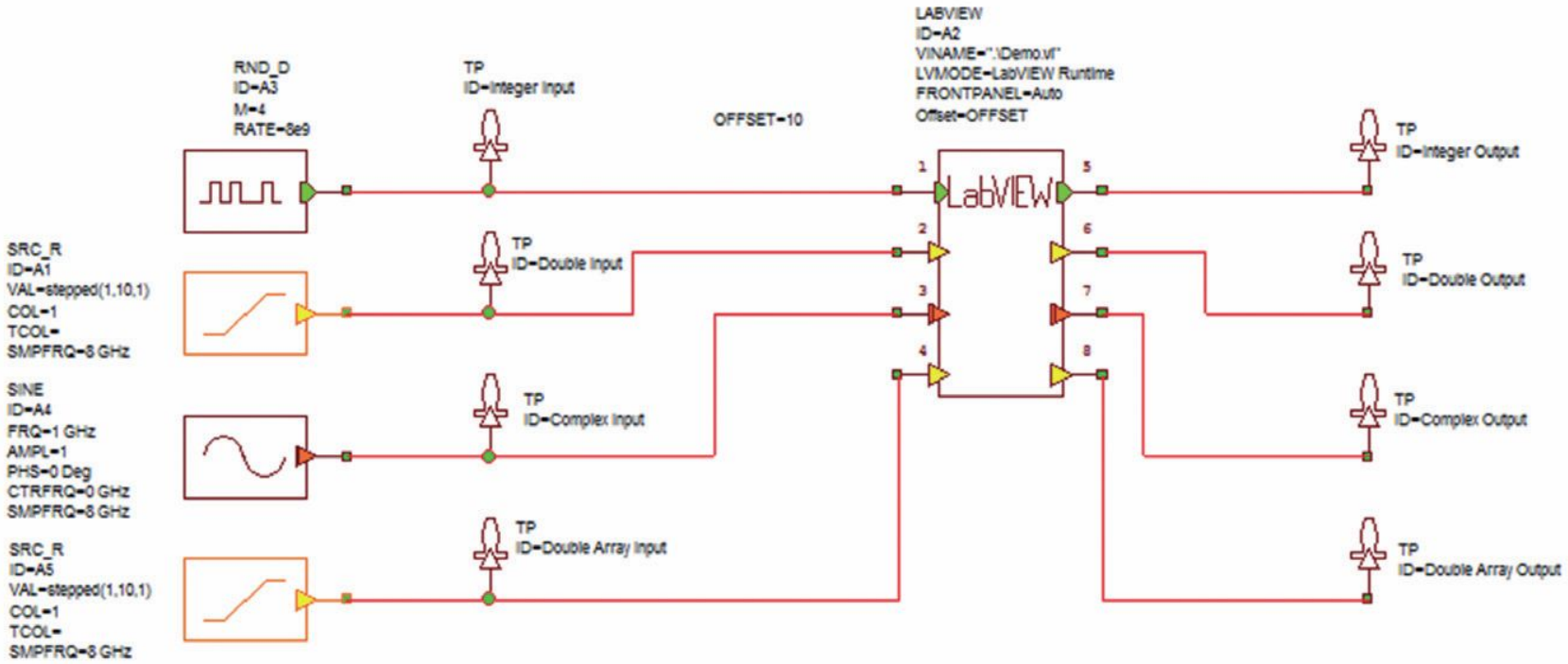
Так выглядит программа на языке LabVIEW

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:

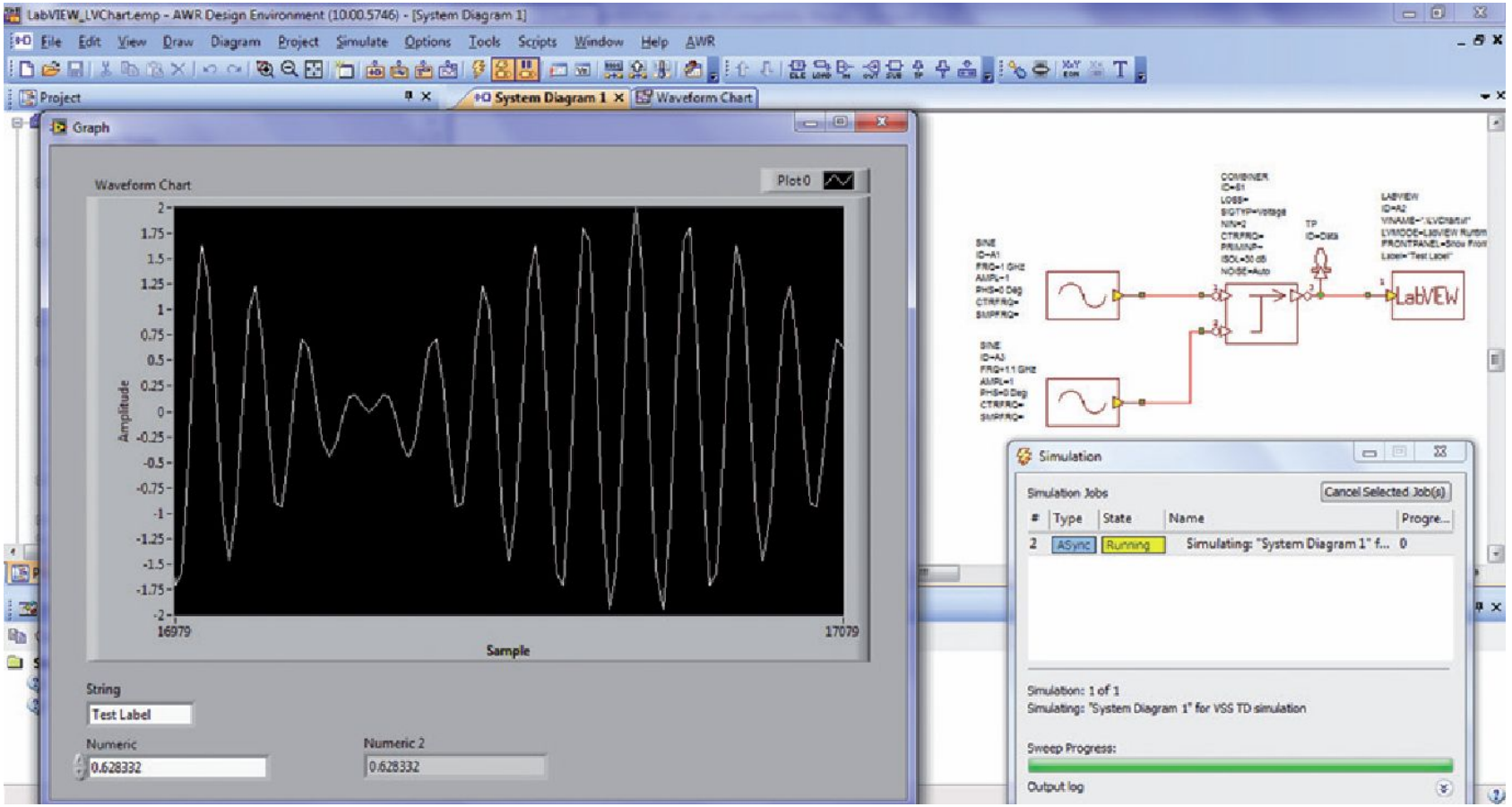


Интеграция измерительных систем (LabVIEW) с системами моделирования (AWRDE)

- 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)

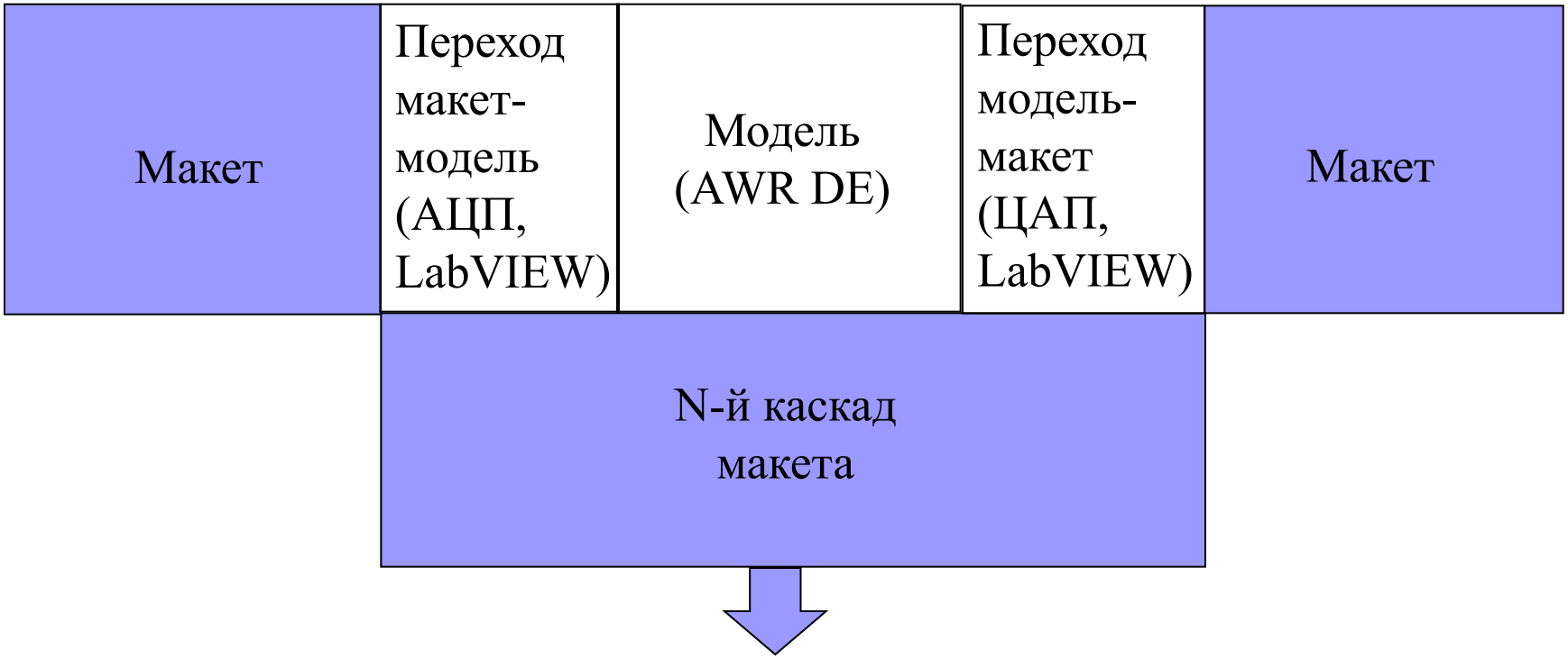
- Второй вариант: для совместного отображения расчетных и экспериментальных графиков можно использовать LabVIEW:



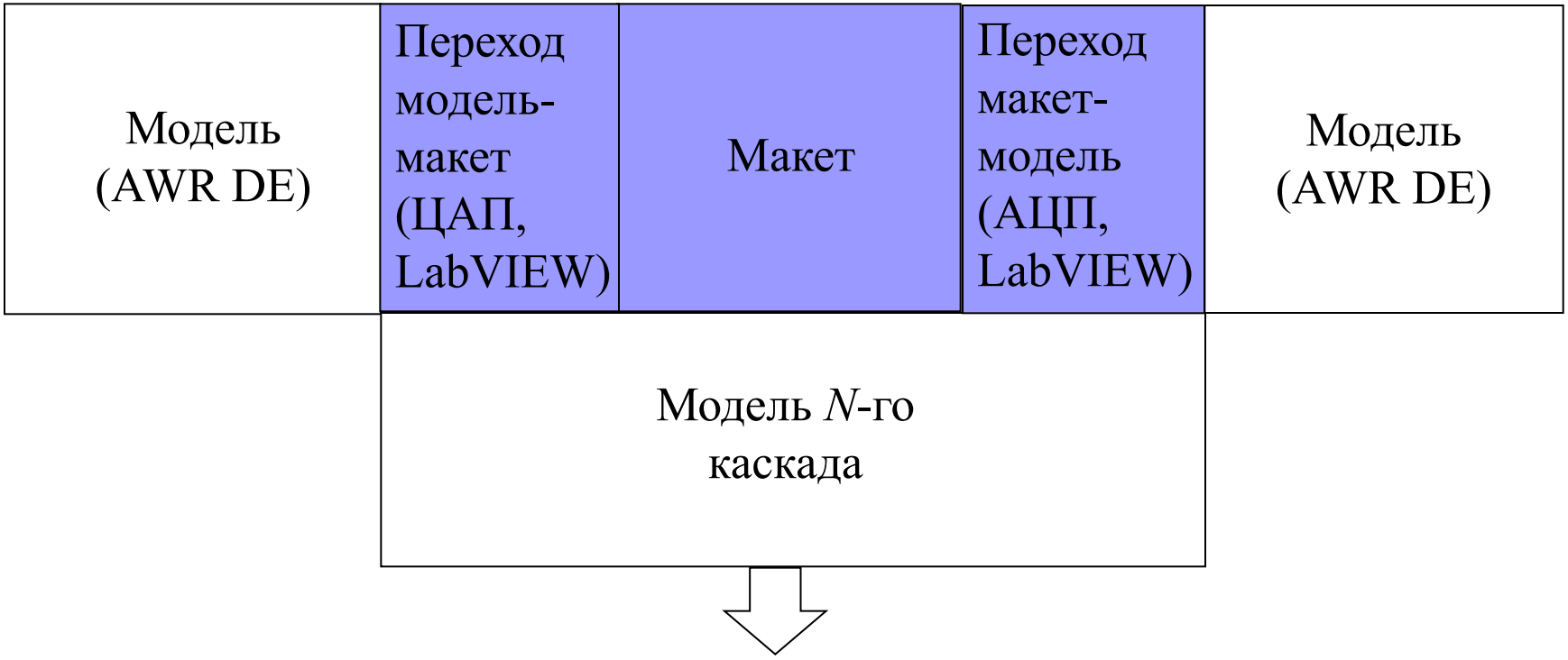
Возможная стратегия применения интегрированных систем измерения и моделирования

- 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

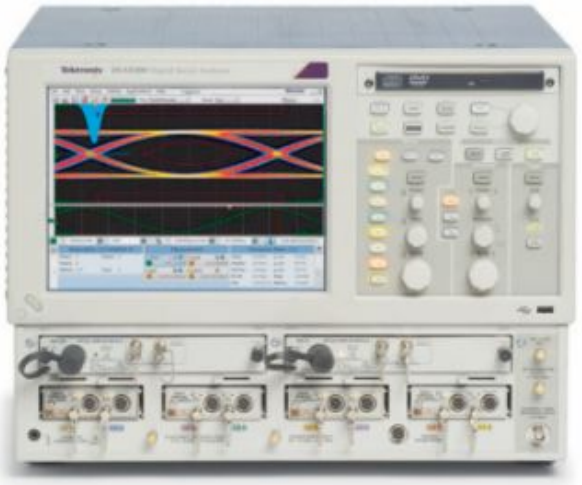
- Средства экстракции параметров моделей делятся на:
  - линейные;
  - нелинейные.
- Экстракция параметров линейных моделей (двухполюсников, четырехполюсников, многополюсников) осуществляется при помощи векторных измерителей характеристик цепей (Vector Network Analyzer, VNA).

Векторные измерители характеристик цепей

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

Примеры векторных измерителей характеристик цепей

- С частотным свипом Keysight E5080A

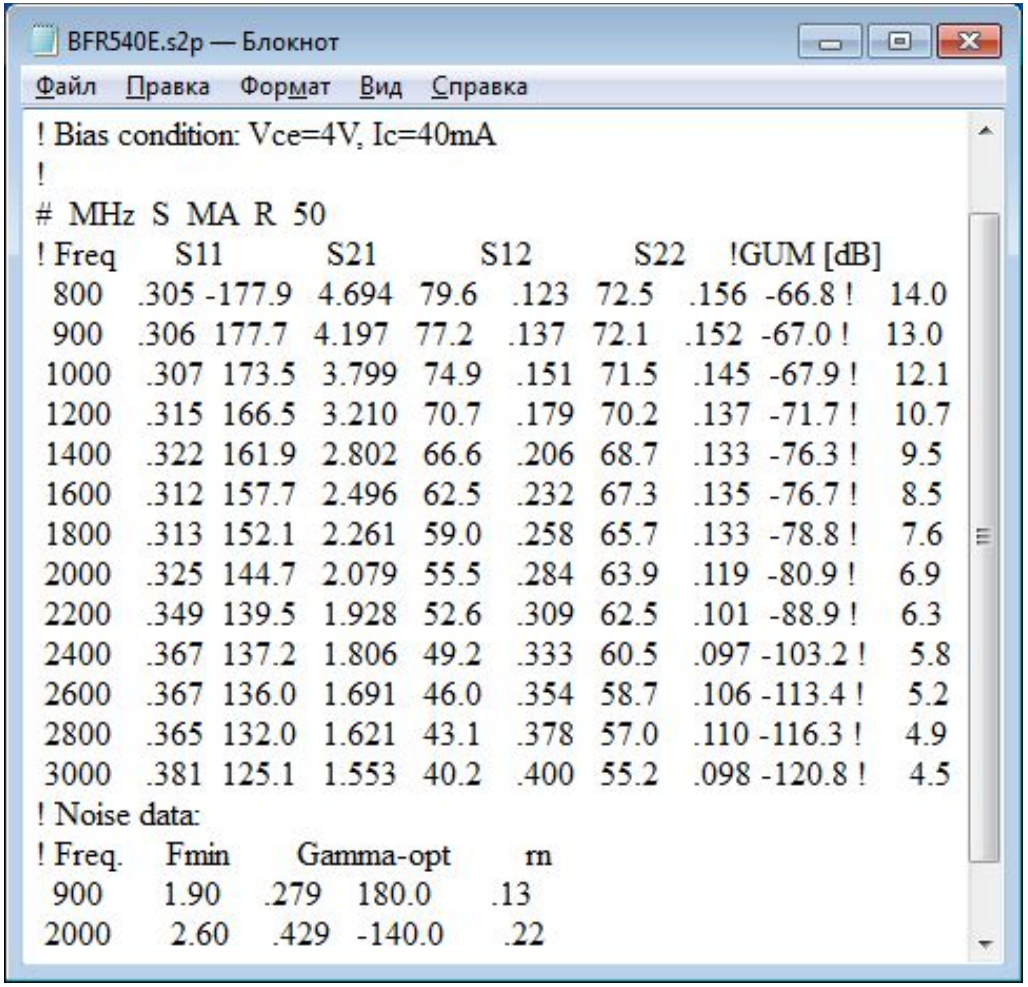


- Рефлектометр с преобразованием Фурье

- С СШП тестовыми сигналами Keysight N7081A

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 В, $i_К$ = 40 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      rn
  900     1.90    .279   180.0    .13
 2000     2.60    .429   -140.0   .22
```

Экстракция параметров нелинейных моделей

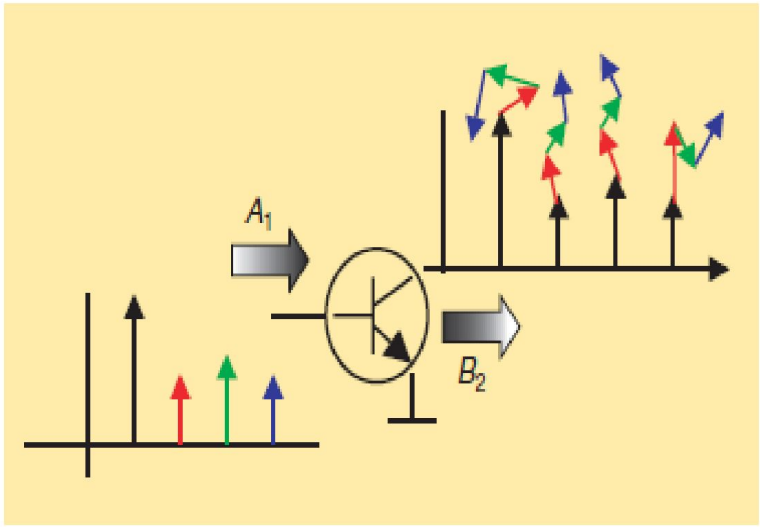
- Существует два класса инструментальных средств для экстракции параметров моделей нелинейных элементов:
  - для «одночастотных» нелинейных моделей элементов – нелинейные векторные измерители характеристик цепей (Nonlinear Vector Network Analyzer, NVNA);
  - для универсальных (SPICE) моделей – характериографы.

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

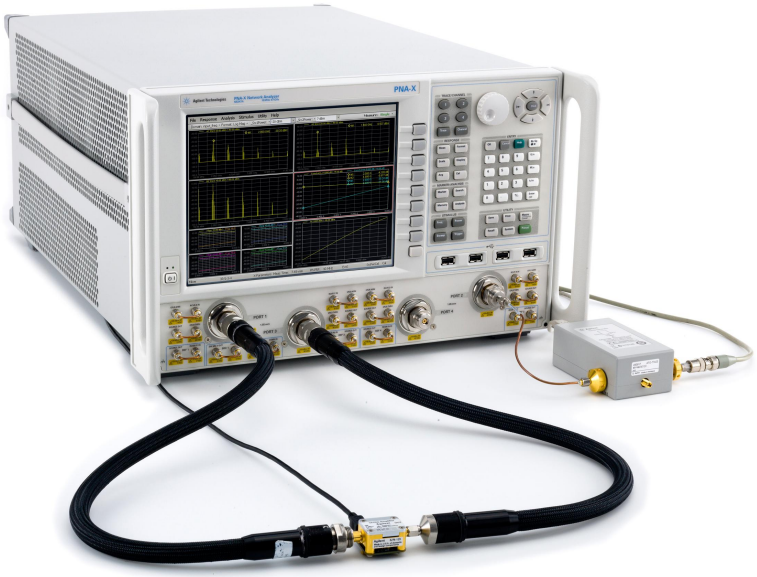
Измерение *X*-параметров

- 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

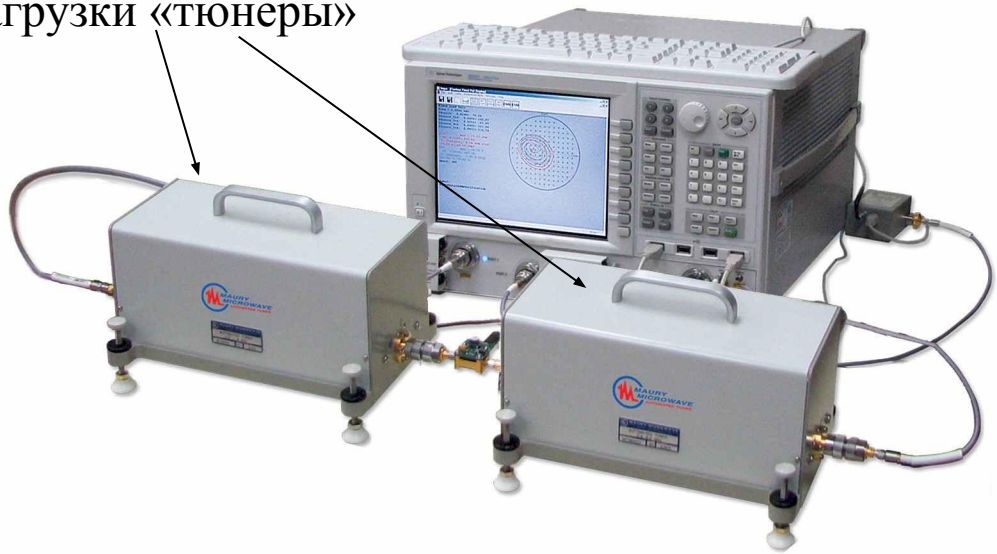
- Коэффициенты в системе *X*-параметров зависят не только от амплитуды падающей на объект волны, но и от сопротивления подводящей и отводящей линий.
- Поэтому для получения полной модели нелинейного объекта в системе *X*-параметров приходится табулировать коэффициенты матрицы рассеяния для каждого значения (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 характериографов

- 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 характериографа

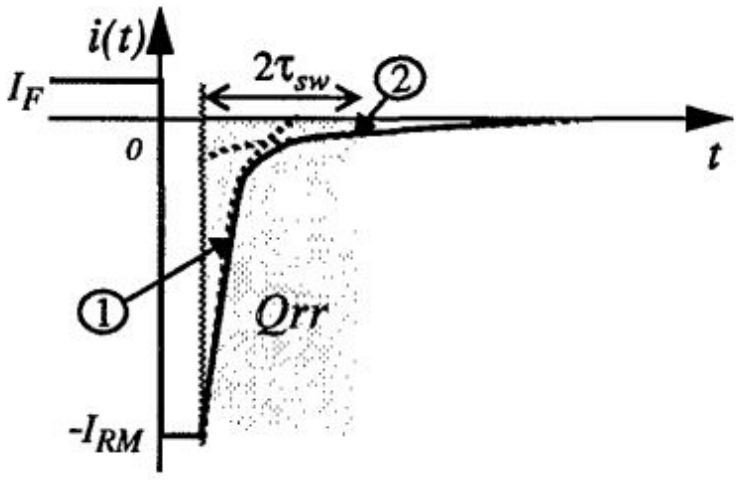
- Keithley 4200

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.