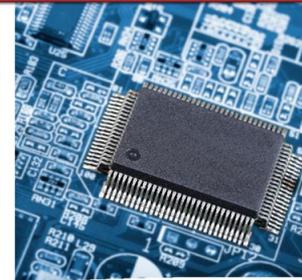
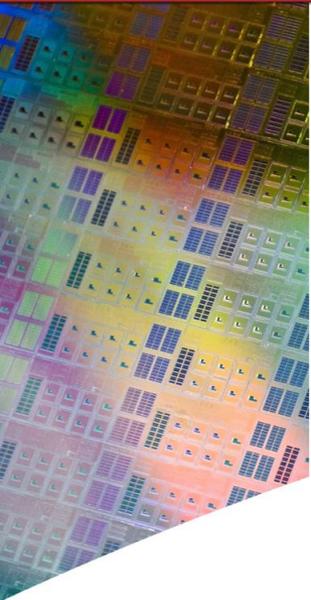


Всероссийская научно-техническая конференция  
«Проблемы разработки перспективных микро- и  
наноэлектронных систем (МЭС-2018)»



**Метод экстракции паразитных  
сопротивлений для раннего анализа  
цепей питания с нерегулярной топологией**

Костас Костович Малинаускас

**SILVACO**

1. Ранний анализ цепей питания интегральных схем
2. Экстракция паразитных сопротивлений и постановка задачи
3. Новый метод экстракции сопротивлений
4. Визуализация падений напряжения
5. Экспериментальные результаты

- **Анализ падений напряжения (IR drop)** – неотъемлемая часть проверки **целостности питания** электронных устройств
  - Обеспечение бесперебойной работы транзисторов
  - Обеспечение требуемой скорости распространения сигналов
  - Включает в себя **экстракцию паразитных сопротивлений**
- **Ранние этапы топологического проектирования**
  - Важно правильно спроектировать цепи питания заранее, чтобы избежать существенных переработок всей топологии, затягивающих сроки выхода продукта рынок
  - Топология не стабильна, множество вариантов на ранних этапах
  - Востребованы быстрые средства анализа целостности питания
  - Востребована детальная визуализация карт падений напряжения, позволяющая точно локализовать проблемные участки цепей питания

# Экстракция паразитных сопротивлений

## Условно точные методы

- Численное решение уравнений электромагнетизма с **высокой точностью**
  - Методы конечных разностей/элементов, граничных элементов, Монте-Карло
  - Применение мелких сеток
- **Большие модели, тяжёлые вычисления, особенно для сложных топологий**
- **При редукции эквивалентных схем теряется точное соответствие исходной топологии**
- **Непрактичны для быстрого анализа больших топологий**

*Применение традиционных методов экстракции затруднительно для раннего анализа больших цепей питания с нерегулярной топологией*

- Неоднородные ширины и направления, разнообразие форм проводников
- Встречаются на старых технологических процессах и в верхних слоях металлизации
- Интеграция блоков разных топологических архитектур в систему на кристалле
- Аналоговые схемы с большой долей ручного проектирования

## Эвристические методы

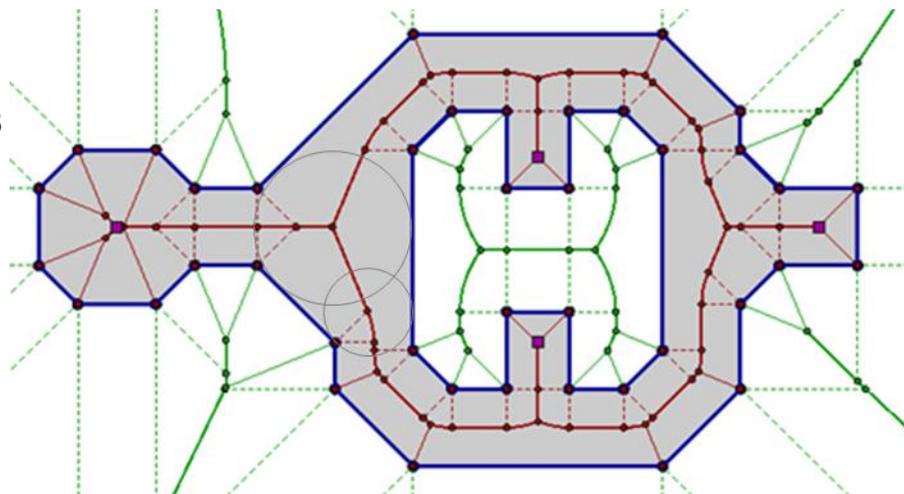
- **Быстрая экстракция компактных моделей**
  - Разбиение проводника на шаблоны
  - Аналитические формулы шаблонных сопротивлений
- **Размер и точность модели чувствительны к способу разбиения**
- **Разбиение часто нетривиально и неоднозначно**
- **Применимость ограничена набором шаблонов (преимущественно прямоугольной формы)**

## Разработать метод экстракции сопротивлений ИС

- Многоугольных проводников произвольной формы
- Обладающий высоким быстродействием
- Генерирующий эквивалентные схемы малого размера
- Обладающий разумной точностью
- Сохраняющий точное геометрическое соответствие эквивалентных схем исходной топологии
- Позволяющий подробно визуализировать IR-drop карты

# Диаграмма Вороного и медиальная ось

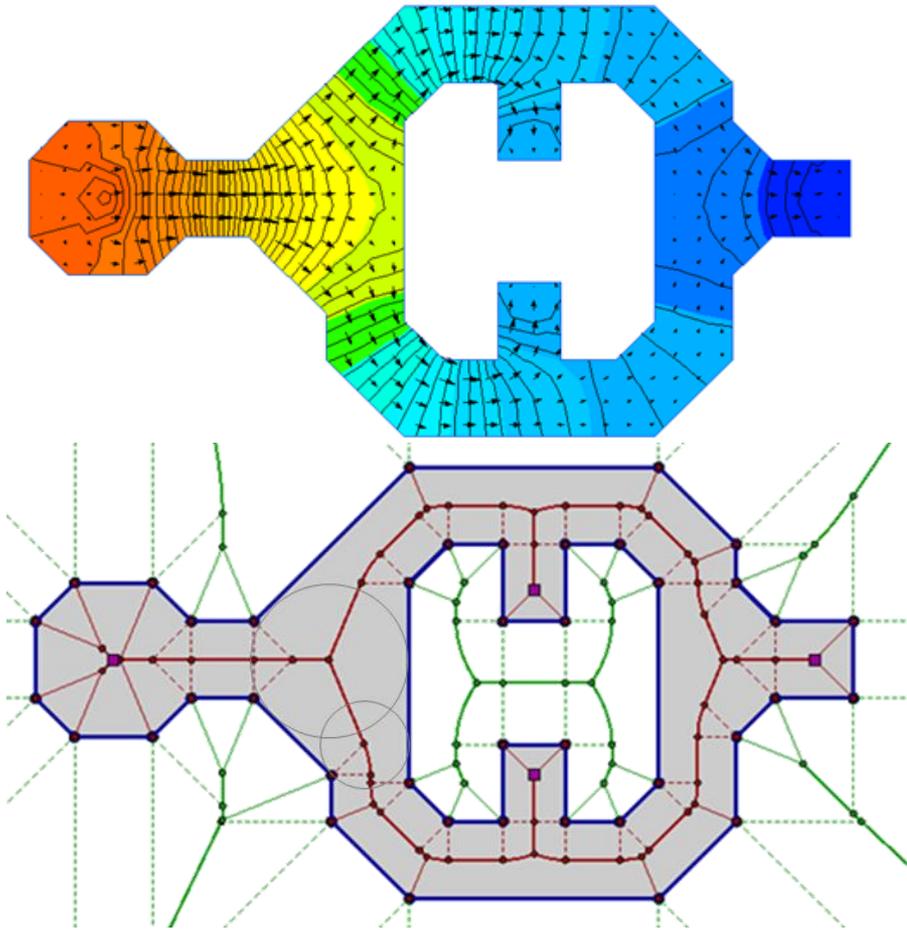
- Диаграмма Вороного  $VD(S)$  (ДВ) для набора плоских объектов  $S$  – разбиение плоскости на **ячейки Вороного  $VR(s)$**  – локусы точек, расположенных ближе к одному из объектов  $s \in S$ , чем к остальным
- Диаграмма Вороного простого многоугольника (возможно с дырками) – ДВ для его сторон (открытых отрезков) и вершин (точек)
- **Медиальная (срединная) ось многоугольника** – геометрическое место центров окружностей, содержащихся внутри многоугольника и касающихся границы минимум в двух точках; их радиусы задают **радиус-функцию** на точках медиальной оси



	Внутренняя часть ДВ
	Внешняя часть ДВ
	Вспомогательные рёбра ДВ
	Медиальная ось

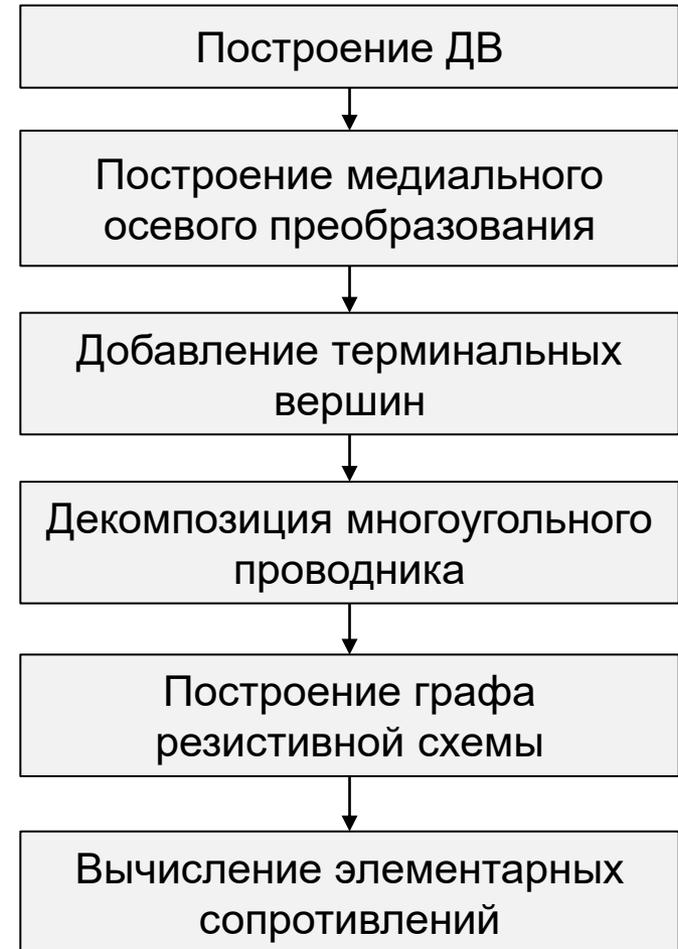
Диаграмма Вороного многоугольника  
содержит его медиальную ось

# Новый метод экстракции сопротивлений с использованием ДВ



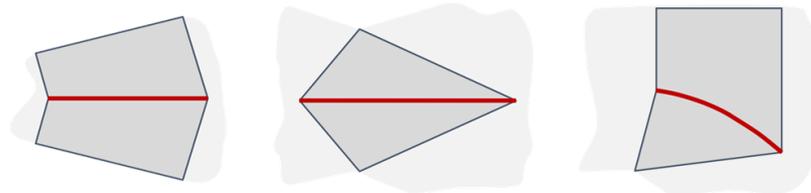
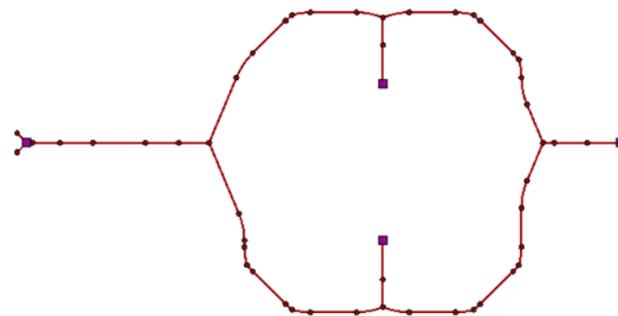
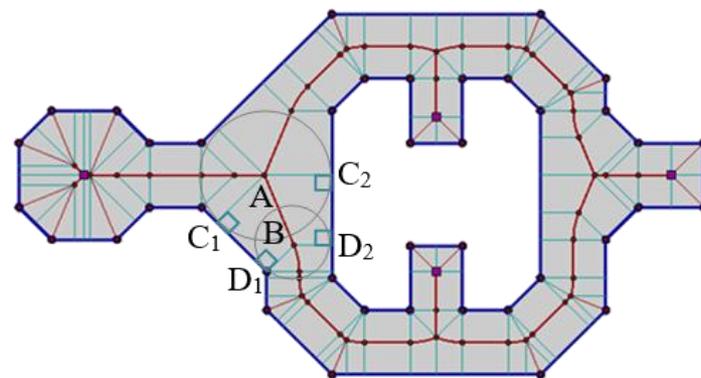
**Основная идея:** направления тока в одномерном приближении приблизительно соответствуют направлениям линий медиальной оси

- 7 -



# Декомпозиция проводника и построение резистивной цепи

- **Декомпозиция проводника** производится вдоль медиальной оси перпендикулярами к его границе
- **Эквивалентная цепь** строится из элементарных резисторов и имеет оптимальный (линейный) размер
- **Элементарный резистор** – в общем случае шестиугольник  $AC_1D_1BD_2C_2$ , порождённый ребром  $AB$  оси
- **Размеры контактов элементарного резистора** определяются значениями радиус-функции  $r_A=r(A)$  и  $r_B=r(B)$
- **Рёбра оси, касающиеся границы проводника**, считаются эквипотенциальными и исключаются из модели (бесконечные сопротивления)



Элементарные проводники трёх типов

## Тип I. Две трапеции

### Геометрические соотношения

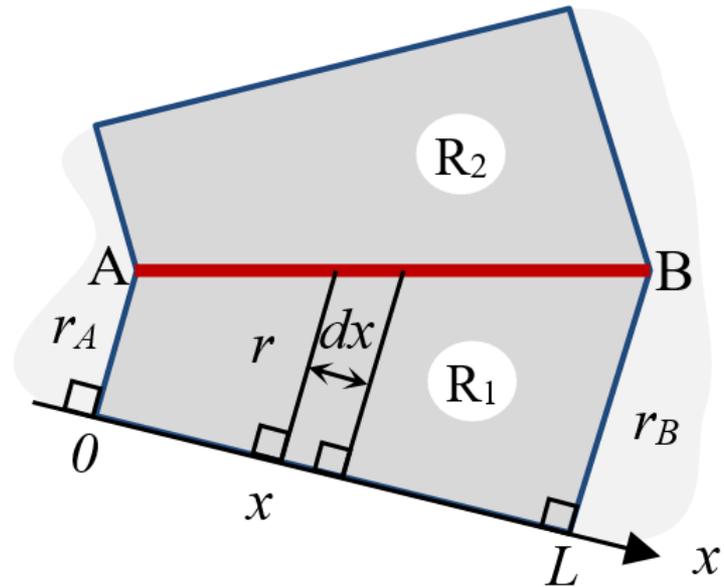
$$r = r_A + \frac{r_B - r_A}{L} x, \text{ где } L = \sqrt{|AB|^2 - (r_B - r_A)^2}$$

### Оценка сопротивления

$$dR_1 \approx \frac{dx}{r} = \frac{dx}{r_A + \frac{r_B - r_A}{L} x} = \frac{L \cdot dx}{(r_B - r_A)x + r_A L}$$

$$R \approx \frac{R_1}{2} \approx \frac{1}{2} \int_0^L \frac{L \cdot dx}{(r_B - r_A)x + r_A L} = \left( \frac{L \cdot \ln |(r_B - r_A)x + r_A L|}{2(r_B - r_A)} \right) \Big|_0^L$$

$$R \approx \frac{L \cdot \ln r_B / r_A}{2(r_B - r_A)}, \text{ где } L = \sqrt{|AB|^2 - (r_B - r_A)^2}$$
$$R \approx \frac{L(r_A + r_B)}{4}, \text{ при } r_A \approx r_B$$



## Тип II. Два треугольника

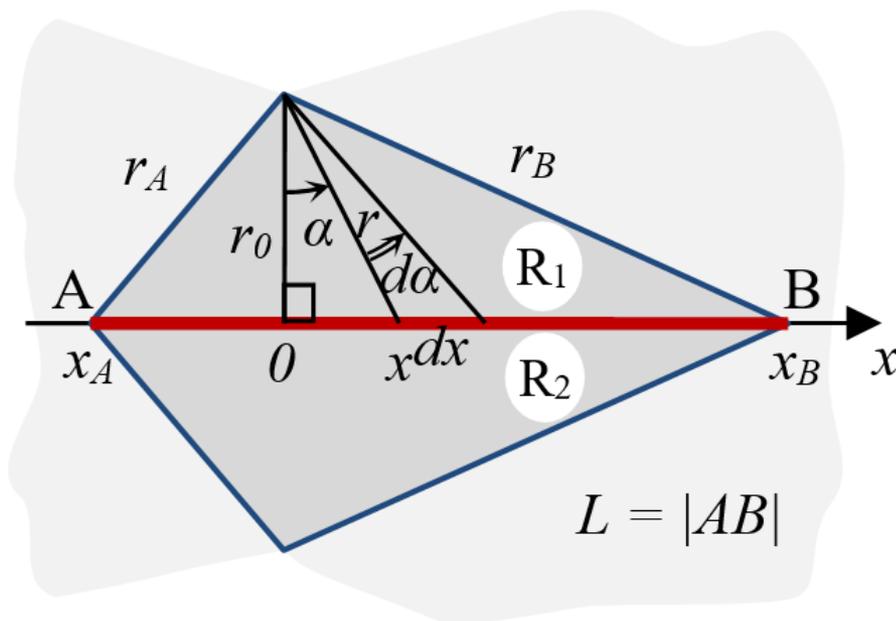
### Геометрические

#### соотношения

$$x_{A,B} = \frac{r_B^2 - r_A^2 \mp L^2}{2L}, \text{ где } L = x_B - x_A$$

$$\sin \alpha_{A,B} = \frac{x_{A,B}}{r_{A,B}} = \frac{r_B^2 - r_A^2 \mp L^2}{2Lr_{A,B}}$$

$$r = r_0 / \cos \alpha; \quad x = r_0 \tan \alpha$$



### Оценка сопротивления

$$dR_1 \approx \frac{dx}{2r} = \frac{r_0 \cos \alpha \cdot d\alpha}{2r_0 \cos^2 \alpha} = \frac{d\alpha}{2 \cos \alpha}$$

$$R \approx R_1/2 \approx \frac{1}{2} \int_{\alpha_A}^{\alpha_B} \frac{d\alpha}{2 \cos \alpha} = \left( \frac{1}{8} \ln \left| \frac{\sin \alpha + 1}{\sin \alpha - 1} \right| \right) \Bigg|_{\alpha_A}^{\alpha_B}$$

$$R \approx \frac{1}{8} \ln \left| \frac{(r_B^2 - r_A^2 + L^2 + 2Lr_B)(r_B^2 - r_A^2 - L^2 - 2Lr_A)}{(r_B^2 - r_A^2 + L^2 - 2Lr_B)(r_B^2 - r_A^2 - L^2 + 2Lr_A)} \right|, \text{ где } L = |AB|$$

## Тип III. «Трапеция» и «треугольник» с общей параболической стороной

### Геометрические

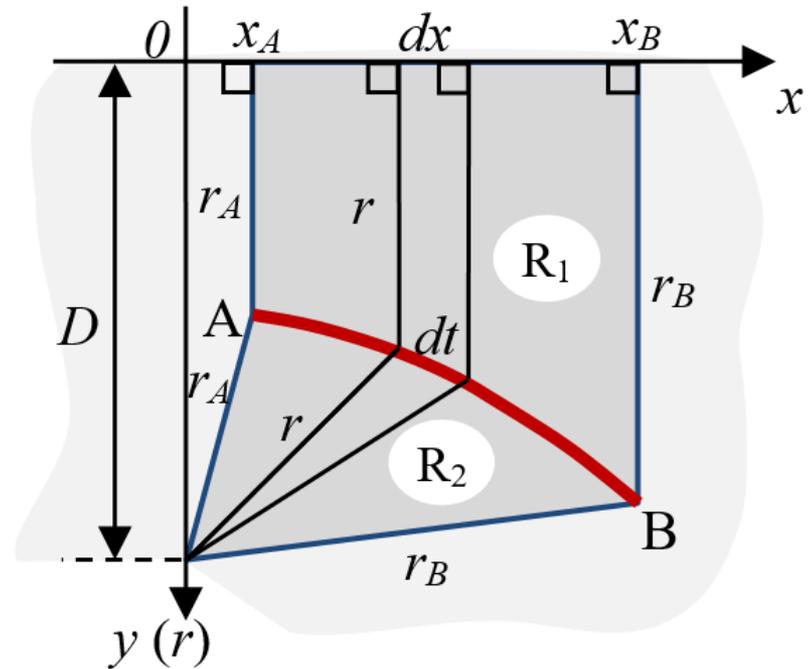
**соотношения**  
 $r = (x^2 + D^2)/2D$ ;  $dr = (x \cdot dx)/D$

$$dt \approx \sqrt{(dx)^2 + (dr)^2} = \sqrt{x^2 + D^2} dx/D$$

### Оценка сопротивления

$$R_1 \approx \int_{x_A}^{x_B} \frac{dx}{r} = \int_{x_A}^{x_B} \frac{2D \cdot dx}{x^2 + D^2} = \left( 2 \tan^{-1} \frac{x}{D} \right) \Big|_{x_A}^{x_B}$$

$$R_2 \approx \int_{x_A}^{x_B} \frac{dt}{2r} = \int_{x_A}^{x_B} \frac{dx}{\sqrt{x^2 + D^2}} = \left( \sinh^{-1} \frac{x}{D} \right) \Big|_{x_A}^{x_B}$$

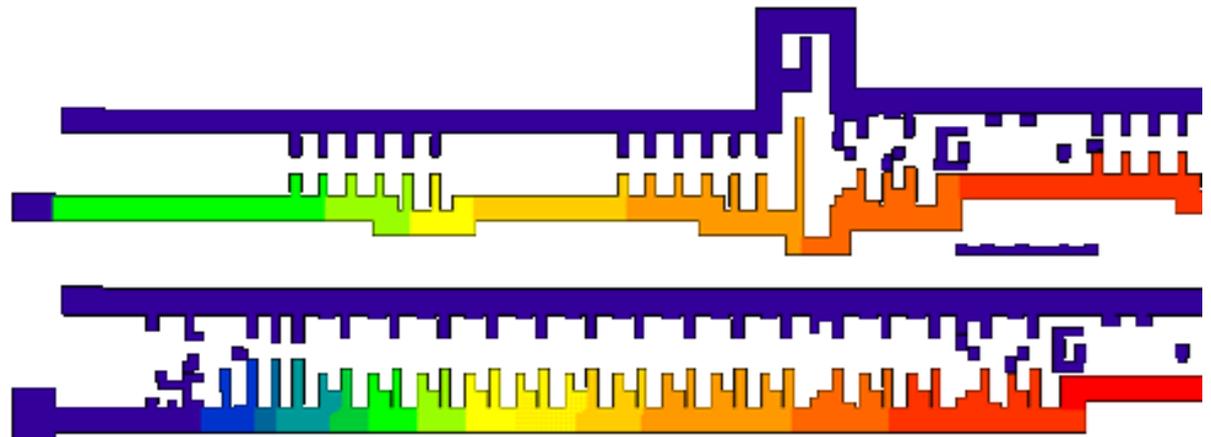
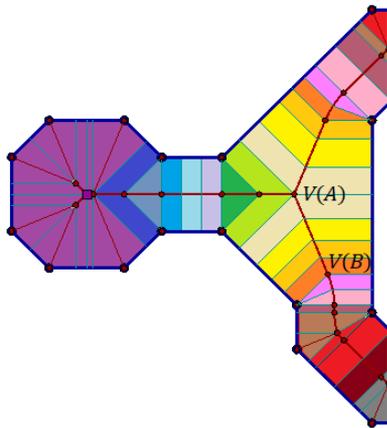


$$R \approx 2 \left[ \tan^{-1} \frac{x_B}{D} - \tan^{-1} \frac{x_A}{D} \right] \parallel \left[ \sinh^{-1} \frac{x_B}{D} - \sinh^{-1} \frac{x_A}{D} \right],$$

где  $D$  – удвоенное фокусное расстояние параболы

# Визуализация падений напряжения

- Параболические рёбра для простоты спрямляются
- После анализа цепи питания известны значения падений напряжения  $V$  в узлах – вершинах медиальной оси
- $V$  вдоль рёбер, касающихся границы (бесконечные сопротивления, исключённые из модели цепи), постоянные
- $V$  вдоль ребра  $AB$  – линейная интерполяция между  $V(A)$  и  $V(B)$
- Линии проекций на границу эквипотенциальны
- Аналогичным образом строятся карты эквивалентных сопротивлений от источников питания и пр.



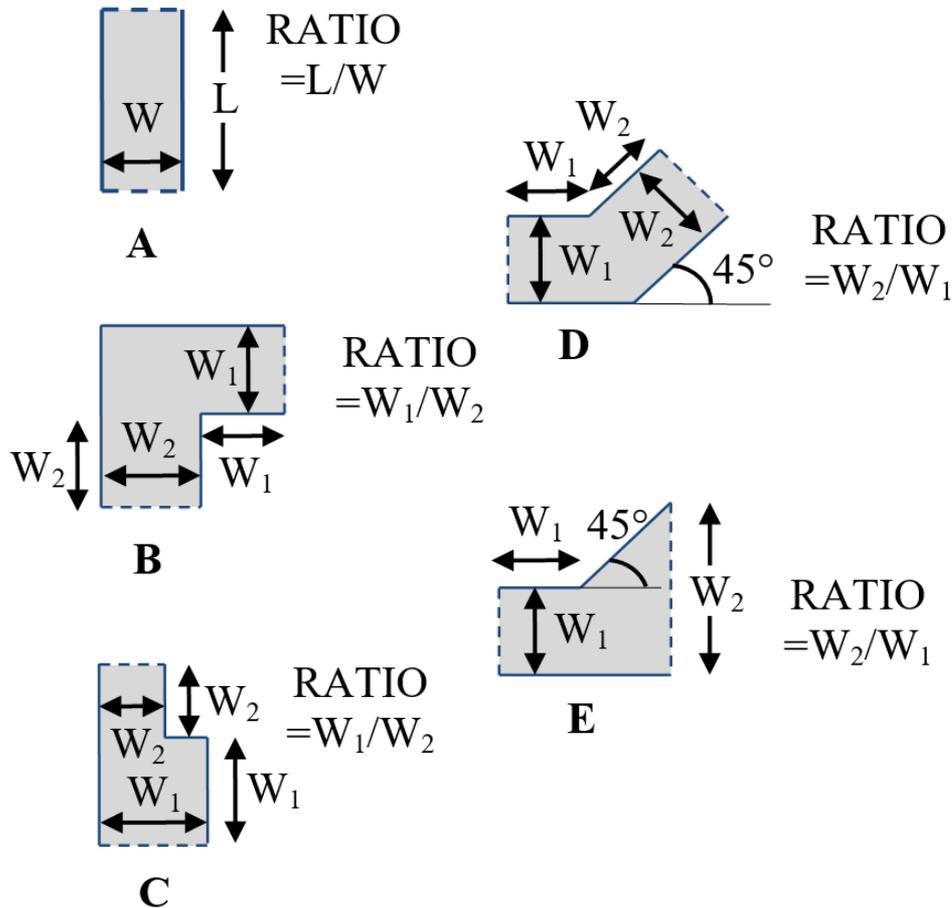
# Эффективность нового метода

## Сравнение эффективности методов на тестовой схеме со сложной топологией

	Плиточная декомпозиция*	Декомпозиция по медиальным осям	Разница
Узлов	471 533	110 149	-77%
Резисторов	880 323	127 360	-86%
Общее время IR-drop анализа	163 сек	17 сек	-90%
Расход памяти	1,27 GB	0,6 GB	-40%

\* Эвристический метод вертикальной и горизонтальной нарезки проводника [Stark D. Analysis of Power Supply Networks in VLSI Circuits. Ph.D. Dissertation. Stanford University, Stanford, CA, USA, 1991] в нашей реализации обобщён на неманхэттенские проводники, для повышения точности пришлось производить частую нарезку наклонных участков

# Точность нового метода



Тест	Ratio	$R_{\text{точн}}^*$	$R_{\text{экстр}}$	Ошибка
A	1	1	1	0%
A	5	5	5	0%
B	1	2.5	2.53	1%
B	1.5	2.55	2.54	0%
B	2	2.6	2.56	-2%
B	3	2.75	2.6	-5%
C	1.5	2.1	1.96	-7%
C	2	2.25	2.07	-8%
C	3	2.5	2.27	-9%
C	4	2.65	2.41	-9%
D	1	2.2	2.26	3%
D	1.5	2.3	2.3	0%
D	2	2.3	2.42	5%
D	3	2.6	2.67	3%
E	1.5	1.45	1.34	-8%
E	2	1.8	1.68	-7%
E	3	2.3	2.17	-6%
E	4	2.65	2.52	-5%

\* Sheehan B.N. Realizable Reduction of RC Networks // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 2007. V. 26, No. 8. P. 1393–1407, Aug. 2007

# Заключение

- **Разработан** метод быстрой экстракции сопротивлений плоских проводников сложной формы
- Метод **реализован** в составе промышленного средства раннего анализа целостности питания Silvaco Invar ® Prime
- Полученные схемы **компактны**, что ускоряет их моделирование
- **Область применения** – системы анализа целостности питания, в частности, аналоговых и смешанных СБИС, печатных плат и других электронных устройств с нерегулярной топологией
- **Точность** метода достаточна на ранних этапах проектирования для оперативной оценки качества множества вариантов топологии
- **Планируется** уточнение формул элементарных сопротивлений на основе численного моделирования уравнений электродинамики для типовых конфигураций