

Методика эффективного расчета переходного процесса ЭЭС на параллельном вычислителе с общей памятью

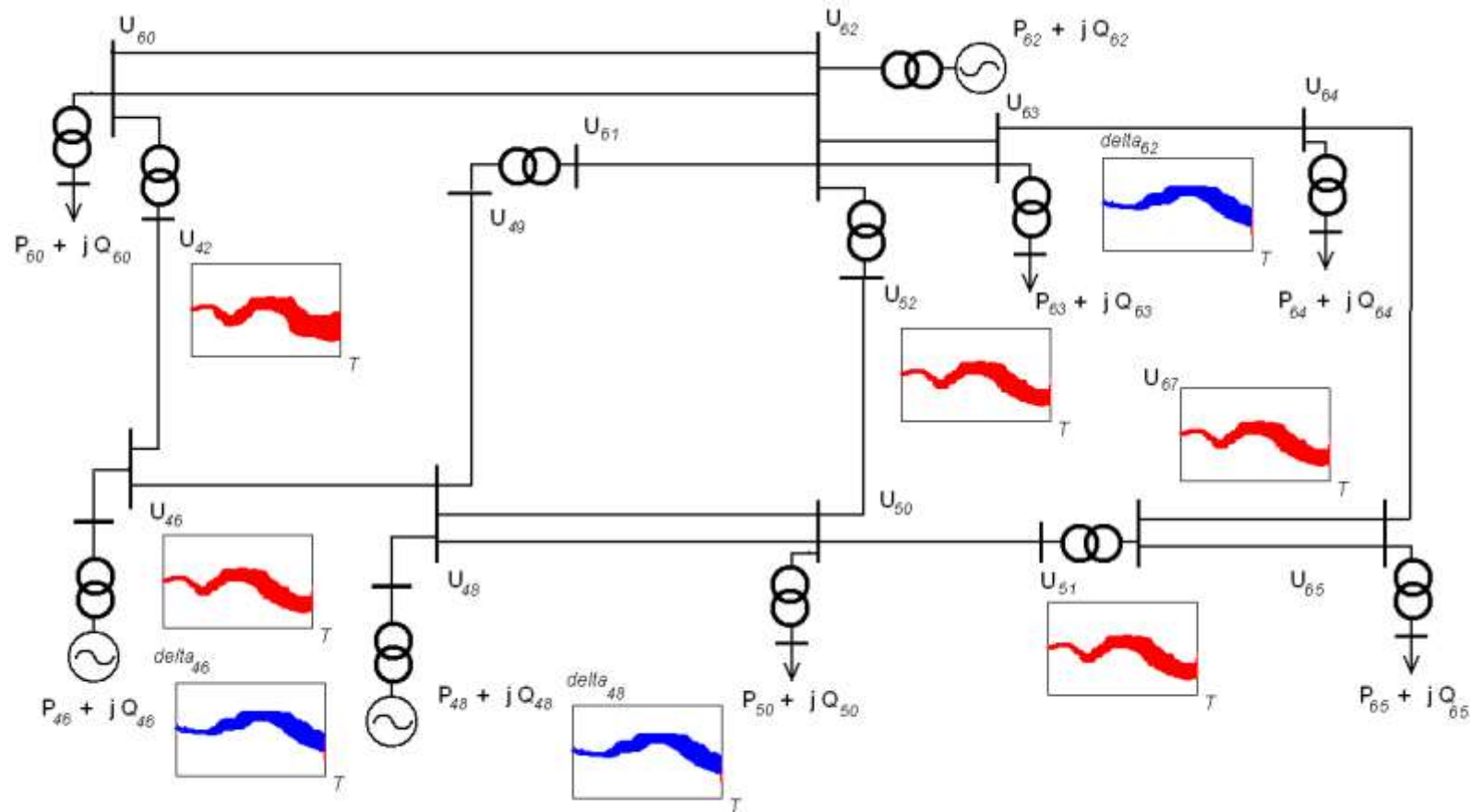
К.И. Апросин

УрФУ, Прософт-Системы

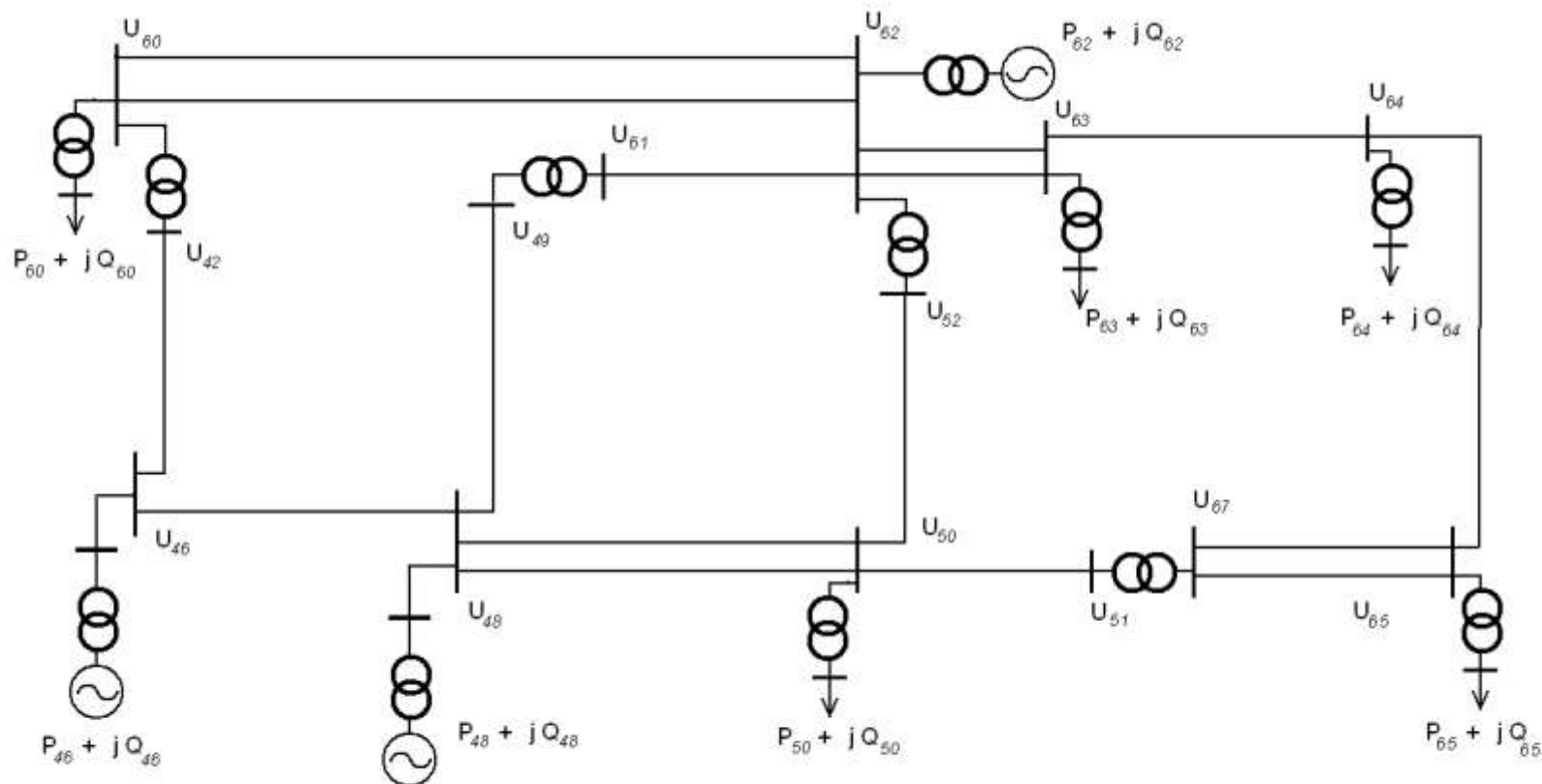
С.И. Семенов

УрФУ

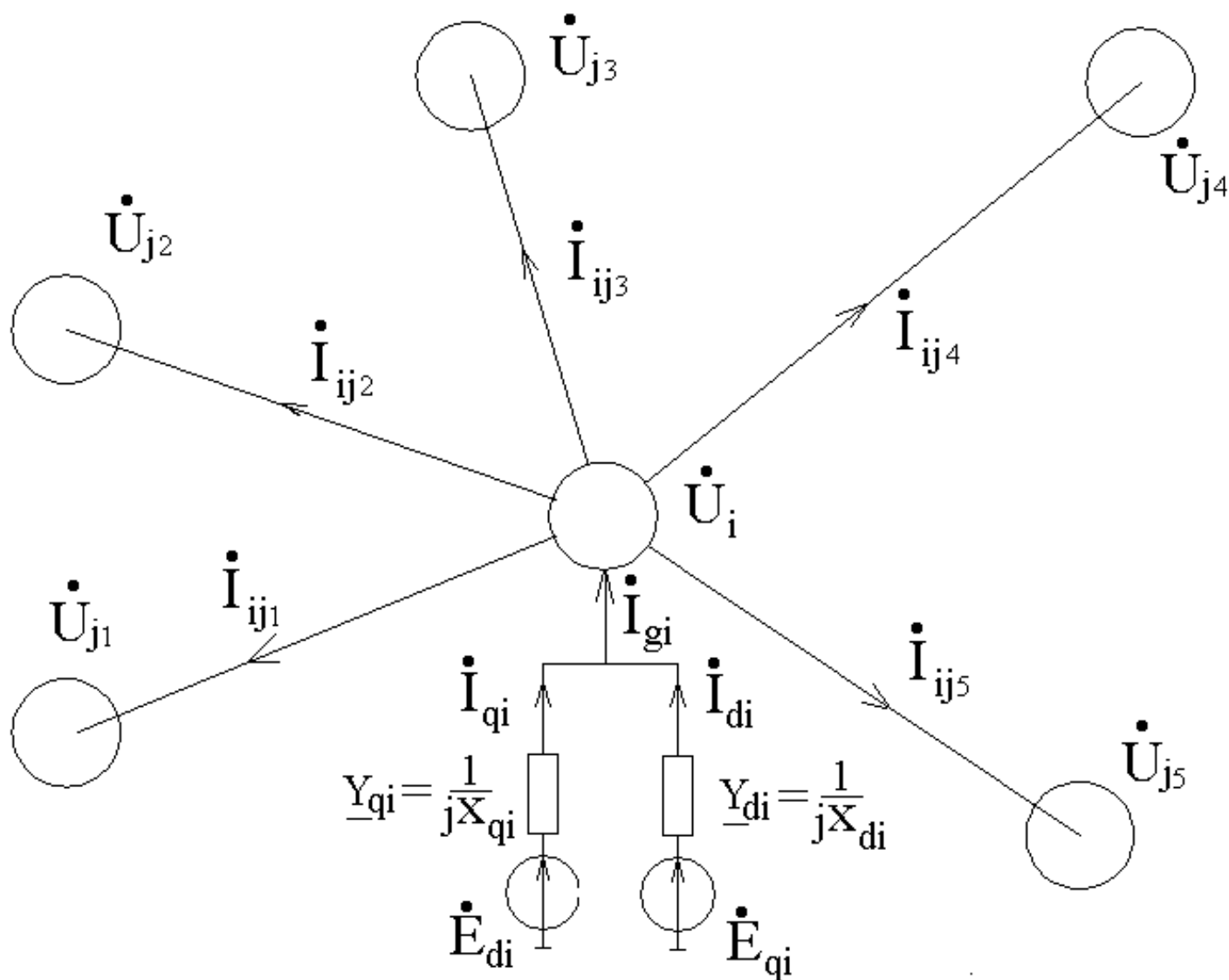
Целью расчета переходного процесса является построение прогноза изменения режима сети во времени после некоторого события в ЭЭС



Установившийся режим ЭЭС – начальные условия для построения прогноза



Модель генератора из двух активных ветвей



Модель сети – система уравнений узловых напряжений в форме баланса токов

$$\begin{bmatrix}
 \underline{Y}_{11} & & & & & & & & \\
 & \underline{Y}_{22} & & & \underline{Y}_{25} & & & & \\
 & & \underline{Y}_{33} & & & & & & \underline{Y}_{39} \\
 & & & \underline{Y}_{44} & & & & & \\
 & \underline{Y}_{25} & & & \underline{Y}_{55} & & & & \\
 & & & & & \underline{Y}_{66} & \underline{Y}_{67} & & \\
 & & & & & \underline{Y}_{76} & \underline{Y}_{77} & & \\
 & & & & & & & \underline{Y}_{88} & \\
 & & \underline{Y}_{39} & & & & & & \underline{Y}_{99}
 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \\ \dot{U}_4 \\ \dot{U}_5 \\ \dot{U}_6 \\ \dot{U}_7 \\ \dot{U}_8 \\ \dot{U}_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \\ \dot{I}_4 \\ \dot{I}_5 \\ \dot{I}_6 \\ \dot{I}_7 \\ \dot{I}_8 \\ \dot{I}_9 \end{bmatrix}$$

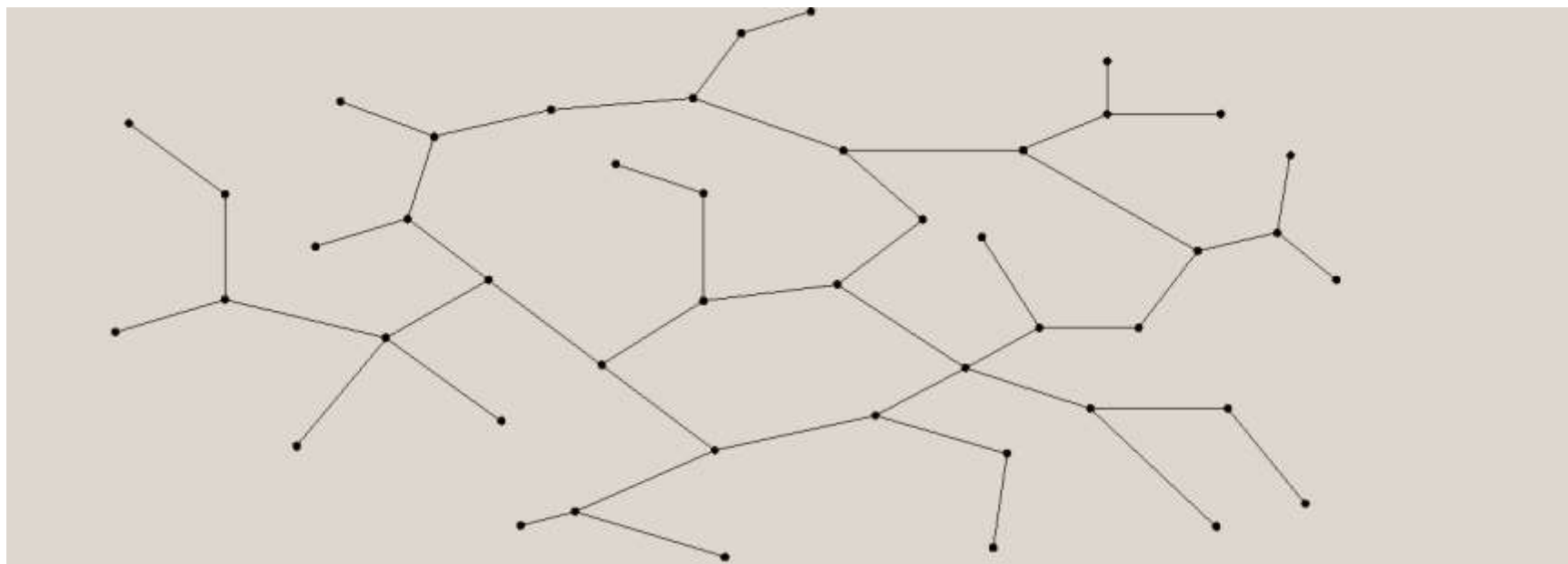
УУН в форме баланса токов – глубоко разреженная СЛАУ

Метод параллельного исключения ветвей

Y_{ii}	Y_{ij}	0	...	0	...
Y_{ji}	Y_{jj}	0	...	0	...
0	0	неизменная часть			
...	...				
0	0				

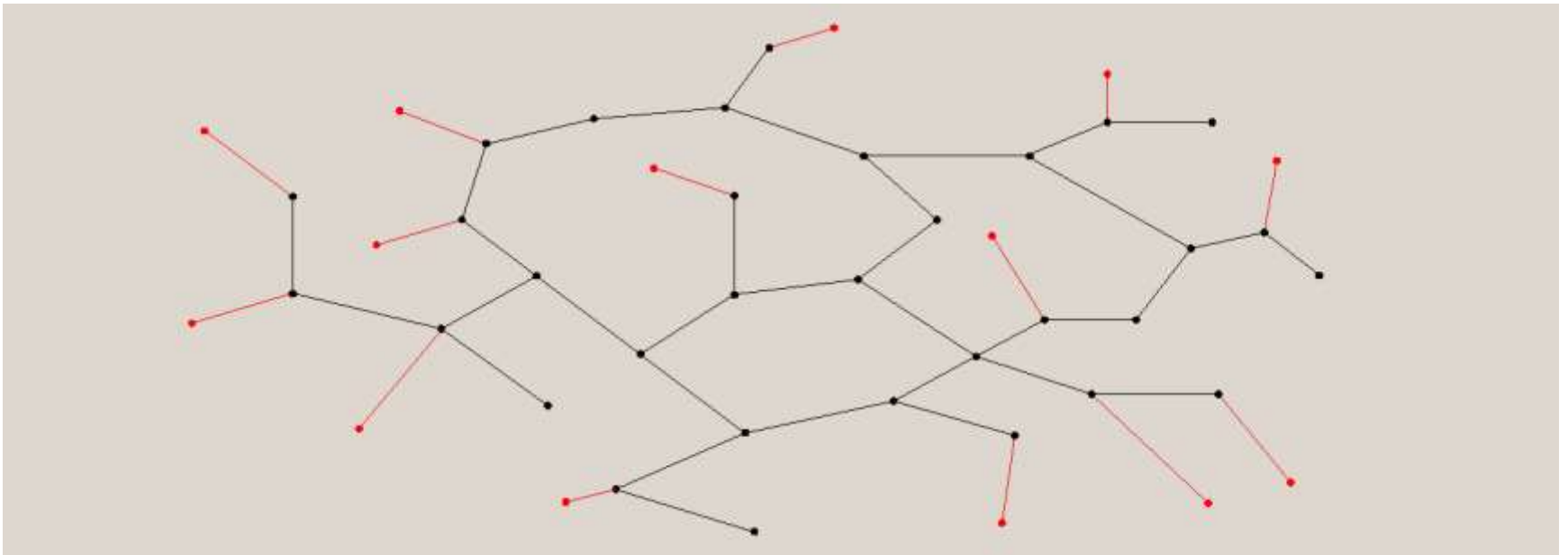
Исключение радиальной связи без
изменения остатка матрицы

Метод параллельного исключения ветвей



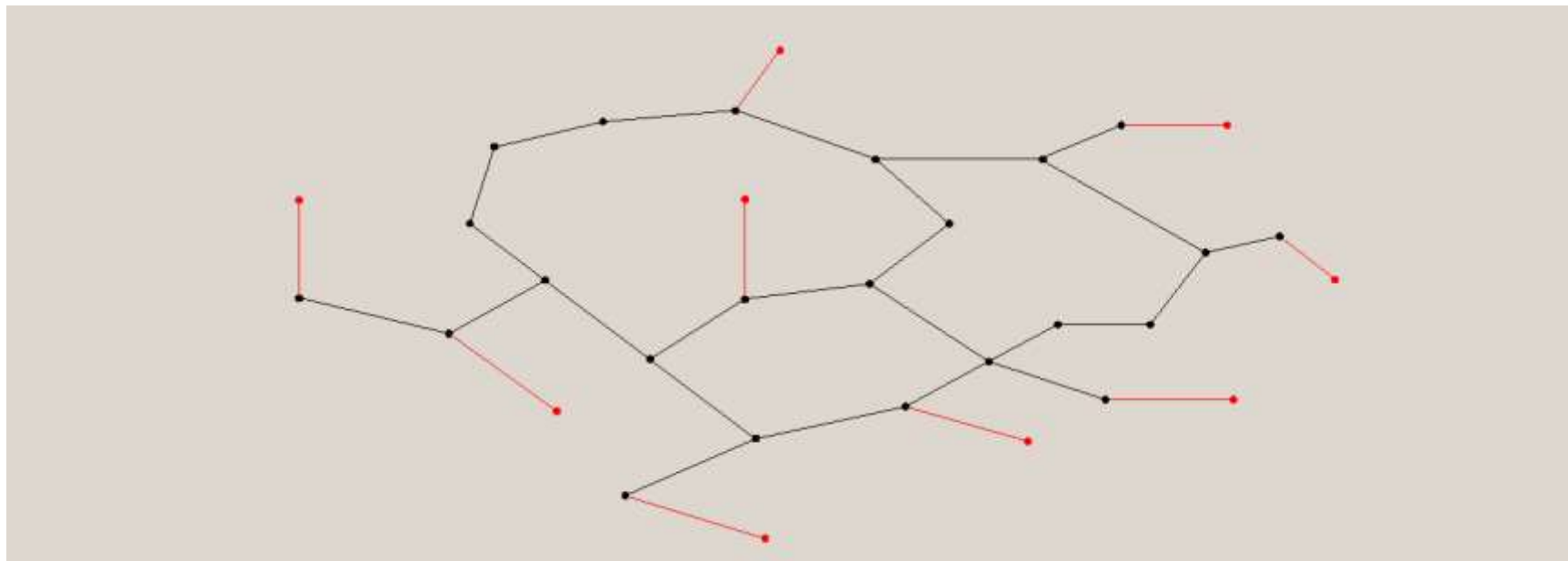
Исходная схема

Метод параллельного исключения ветвей



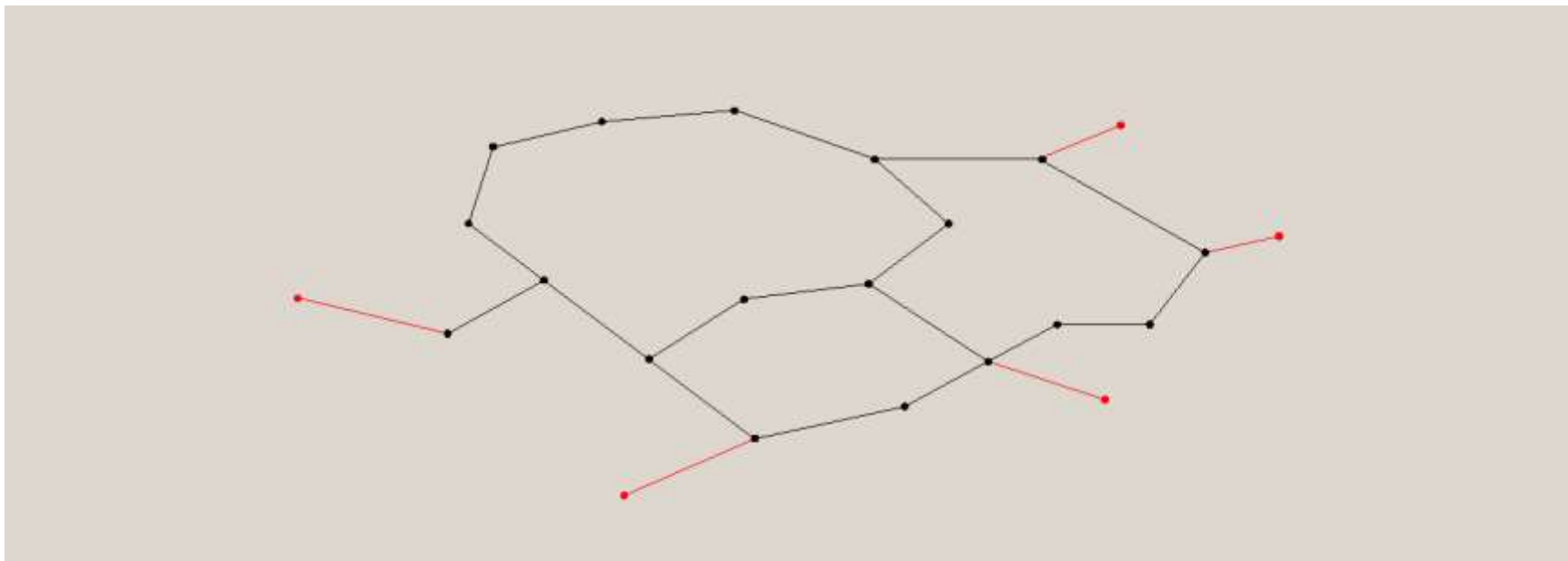
Первый шаг исключения:
14 радиальных ветвей

Метод параллельного исключения ветвей



Второй шаг исключения:
9 радиальных ветвей

Метод параллельного исключения ветвей



Третий шаг исключения:
5 радиальных ветвей

Метод параллельного исключения ветвей



Дальнейшее исключение
неэффективно

Метод параллельного исключения ветвей

Быстродействие метода на случайно сгенерированных матрицах размерностью 2000 узлов (расчет на видеокарте Nvidia GTX-650):

- Общее число итераций прямого хода: 250...300
- Время параллельного прямого хода $Z=L*I$

$TL = 1.6$ мс (128 тредов/блок)

- Время параллельного обратного хода $U=W*Z$

$TL = 1.6$ мс (128 тредов/блок)

- Общее время расчета 3.2 мс

Метод параллельного исключения ветвей

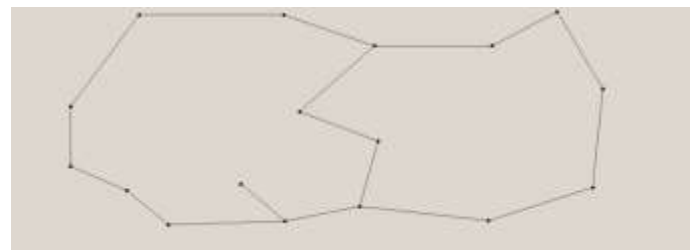
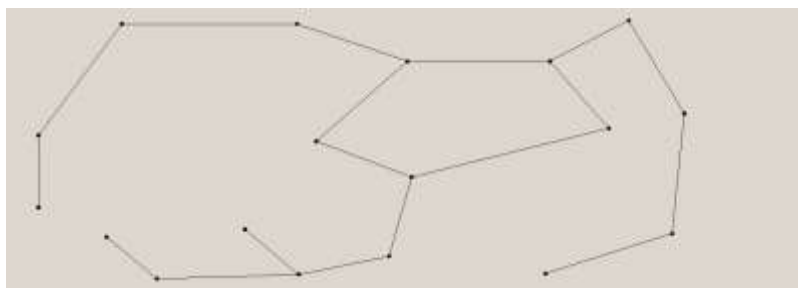
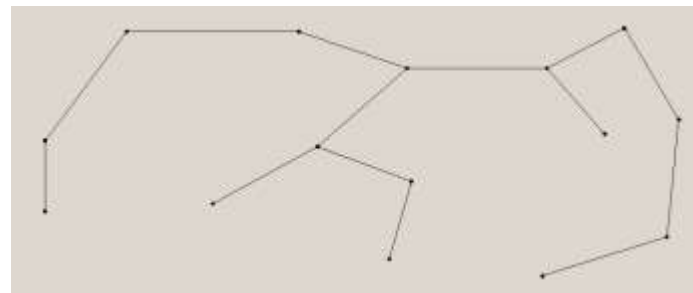
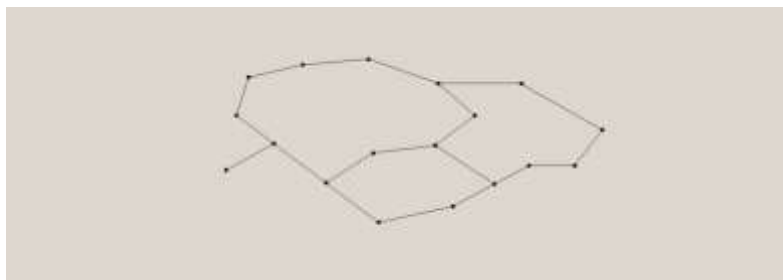
Оценка эффективности метода:

- - исключение первых 50% элементов идет одной итерацией,
- - еще 25% элементов исключается последующими 2-мя ... 5-ю итерациями.
- - каждая из оставшихся итераций исключают всего по несколько элементов (при этом общее их число составляет порядка сотни)

- Вывод:

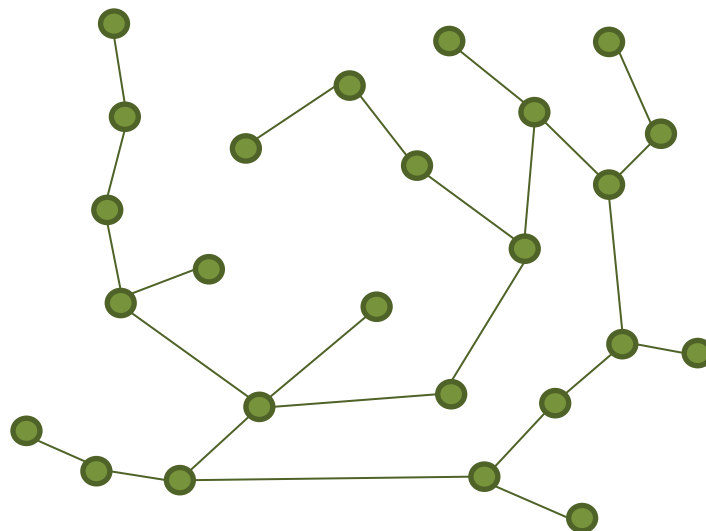
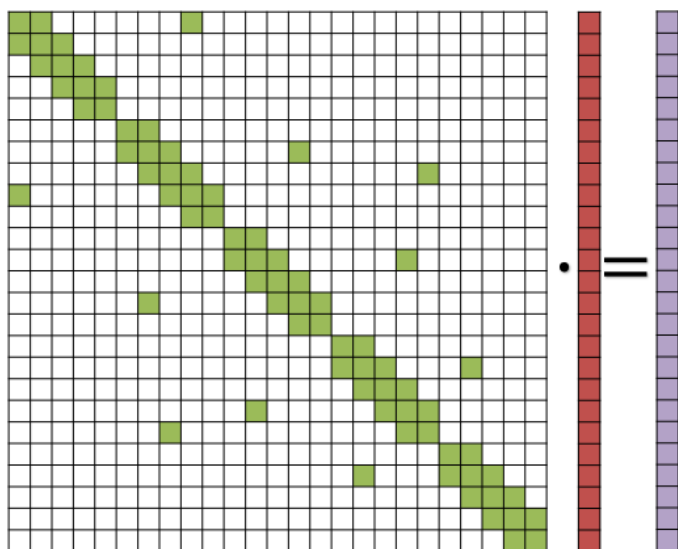
На современной видеокарте 75% ветвей
схемы 2000 узлов исключается за 0.032 мс

Расчет СЛАУ цепочками



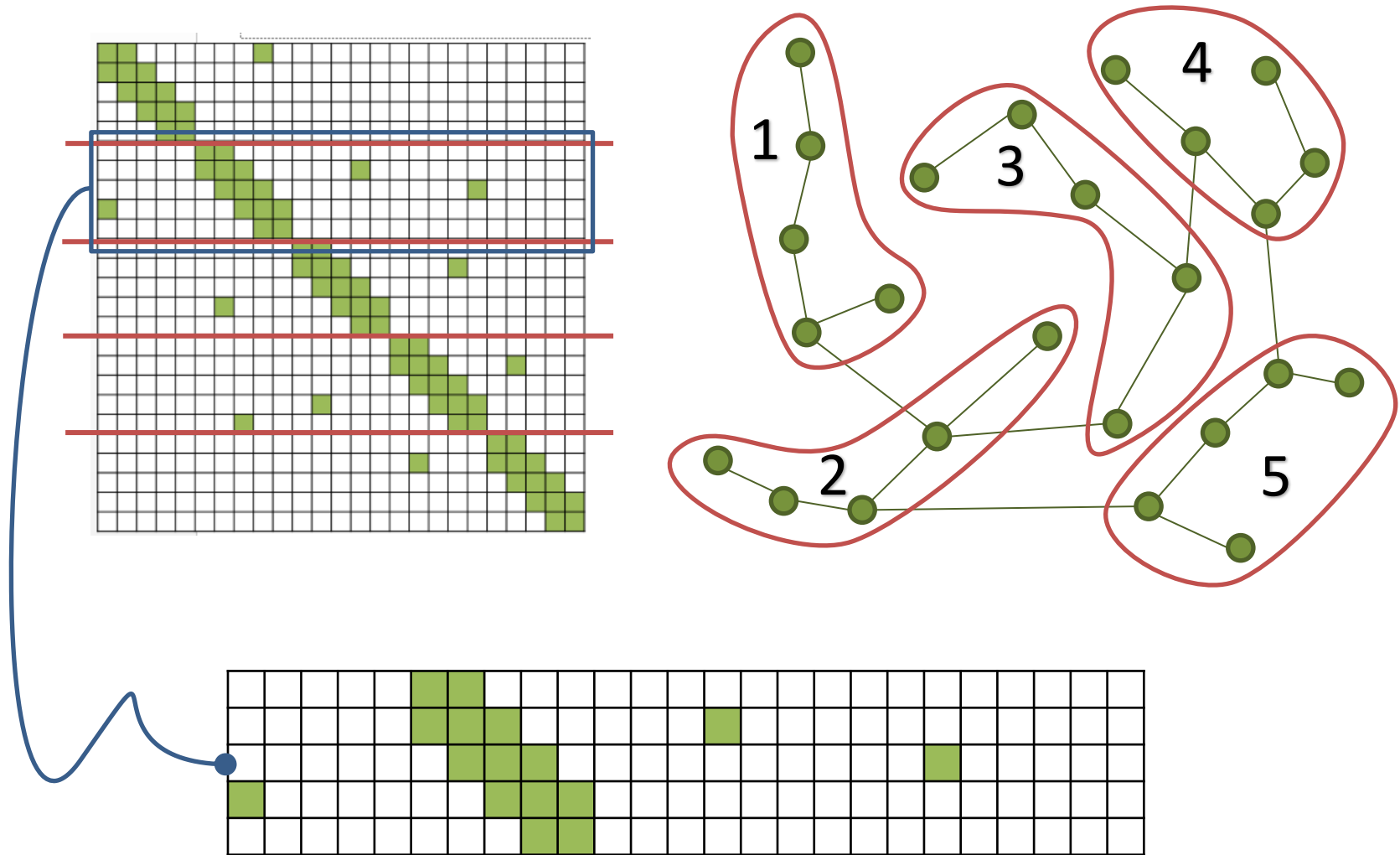
- Остаток сети после исключения радиальных отростков представляет собой специфическую топологию которая состоит из цепочек или колец в которые объединены оставшиеся ветви

Расчет СЛАУ цепочками



- Сеть без радиальных отростков и портрет соответствующей матрицы проводимостей

Расчет СЛАУ цепочками



- Разбиение сети на набор цепочек из связей

Расчет СЛАУ цепочками

$$a_i x_{i-1} + c_i x_i + b_i x_{i+1} = f_i, i = 1, \dots, n, x_0 = x_{n+1} = 0$$

c_1	b_1			f_1	c_1		g_1		$\overline{f}_1$
a_2	c_2	b_2		f_2	$\overline{c}_2$		g_2		$\overline{f}_2$
	a_3	c_3	b_3	f_3		$\overline{c}_3$	g_3		$\overline{f}_3$
		a_4	c_4	b_4			b_4		$\overline{f}_4$
		a_5	c_5	b_5		$\overline{a}_5$	c_5	g_5	$\overline{f}_5$
			a_6	c_6	b_6		$\overline{d}_6$	g_6	$\overline{f}_6$
				a_7	c_7	b_7		g_7	$\overline{f}_7$
				a_8	c_8	b_8		b_8	$\overline{f}_8$
				a_9	c_9	b_9		$\overline{a}_9$	$\overline{f}_9$
					a_{10}	c_{10}	b_{10}		$\overline{d}_{10}$
						a_{11}	c_{11}	b_{11}	$\overline{f}_{10}$
							a_{12}	c_{12}	$\overline{f}_{11}$
									$\overline{f}_{12}$

				f_1	c_1		g_1		$\overline{f}_1$
				f_2		$\overline{c}_2$	g_2		$\overline{f}_2$
				f_3			g_3		$\overline{f}_3$
				f_4			b_4		$\overline{f}_4$
				f_5		$\overline{a}_5$	c_5	g_5	$\overline{f}_5$
				f_6		$\overline{d}_6$		g_6	$\overline{f}_6$
				f_7		$\overline{d}_7$	$\overline{c}_6$	g_7	$\overline{f}_7$
				f_8		d_8		b_8	$\overline{f}_8$
				f_9				$\overline{c}_8$	$\overline{f}_9$
				f_{10}				$\overline{a}_9$	$\overline{f}_{10}$
				f_{11}				$\overline{d}_{10}$	$\overline{f}_{11}$
				f_{12}				$\overline{d}_{11}$	$\overline{f}_{12}$
								$\overline{d}_{12}$	

- Система уравнений, соответствующая цепочке из ветвей может быть решена методом прогонки
- Метод прогонки имеет эффективную параллельную реализацию

Расчет СЛАУ цепочками

- Чтобы объединить отдельные цепочки в исходную сеть необходимо добавить ветви, не попавшие ни в одну из цепочек
- Эти ветви соединяют узлы, находящиеся в разных цепочках
- Чтобы добавить такую ветвь необходимо вычислить столбец обратной матрицы состоящей из узлов двух объединяемых цепочек (при помощи которого можно откорректировать вычисленное напряжение узла цепочки)

Расчет СЛАУ цепочками

$$\begin{bmatrix} dY_{11} & dY_{12} & 0 & \dots & 0 \\ dY_{21} & dY_{22} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Матрица
проводимостей
добавляемой
связи

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2N} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \ddots & Y_{3N} \\ & \vdots & & \ddots & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & Y_{N3} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} d_{11} \\ d_{21} \\ d_{31} \\ \vdots \\ d_{N1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dY_{11} \\ dY_{21} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2N} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \ddots & Y_{3N} \\ & \vdots & & \ddots & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & Y_{N3} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} d_{12} \\ d_{22} \\ d_{32} \\ \vdots \\ d_{N2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dY_{12} \\ dY_{22} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

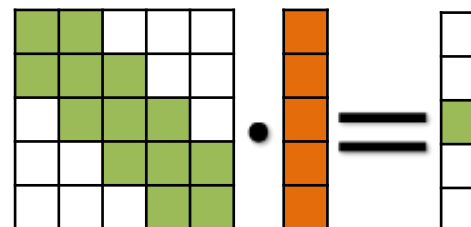
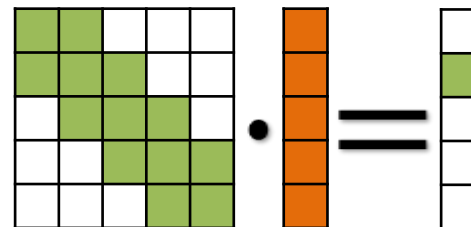
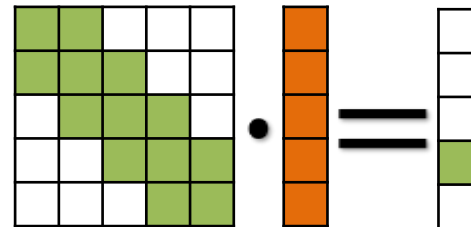
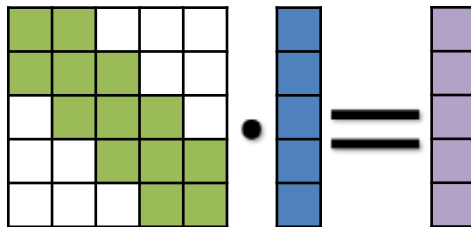
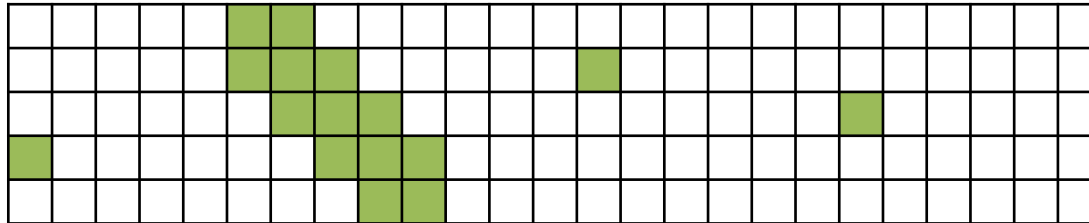
- СЛАУ для вычисления
корректирующих векторов

Расчет СЛАУ цепочками

$$\left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & & 0 \\ 0 & 0 & 1 & & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 & d_{14} & d_{15} & \dots & 0 \\ d_{21} & d_{22} & 0 & d_{24} & d_{25} & \dots & 0 \\ d_{31} & d_{32} & 0 & d_{34} & d_{35} & & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{N1} & d_{N2} & 0 & d_{N4} & d_{N5} & \dots & 0 \end{bmatrix} \right) \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \check{U}_1 \\ \check{U}_2 \\ \check{U}_3 \\ \vdots \\ \check{U}_N \end{bmatrix}$$

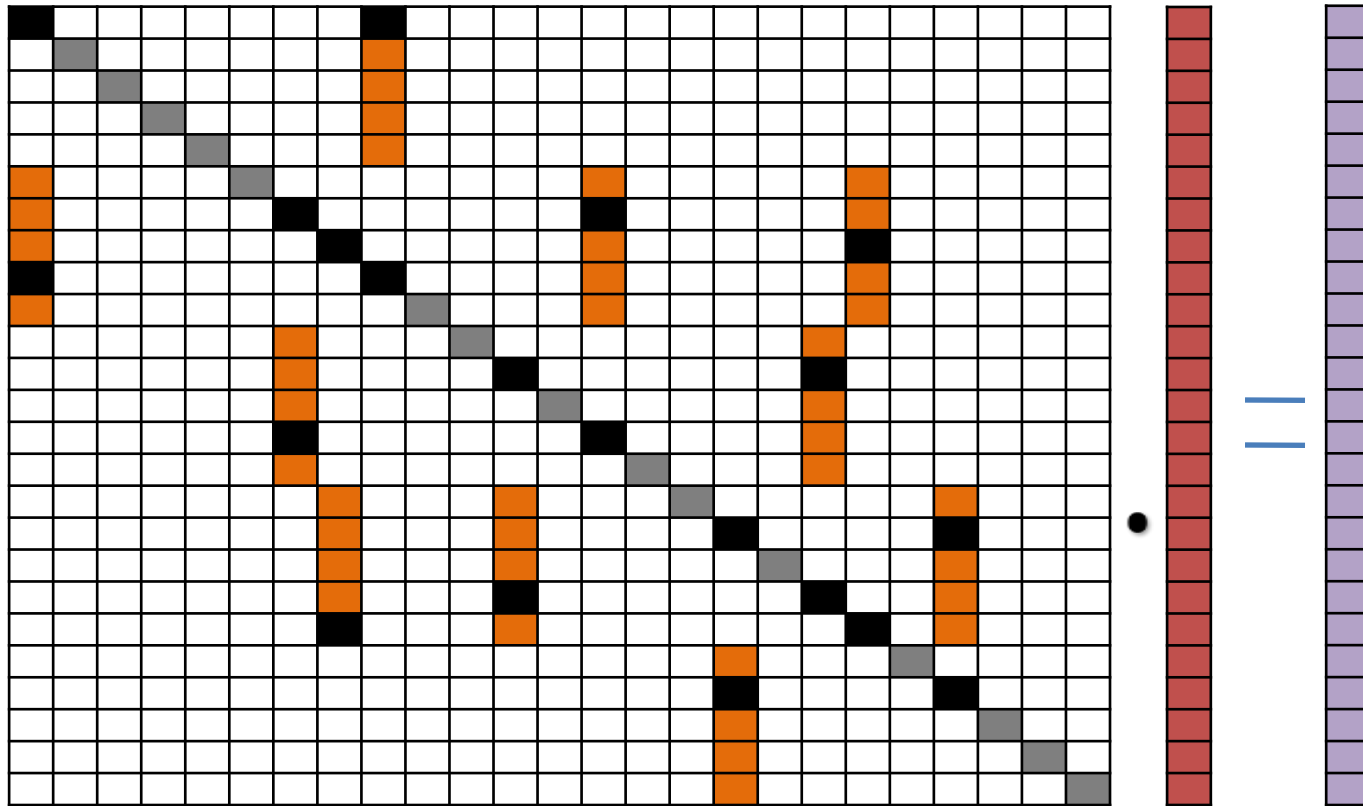
- СЛАУ корректирующая узловые напряжения при добавлении связей
- Исходные данные корректирующей СЛАУ – узловые напряжения, полученные при расчета отдельных цепочек и вырожденная матрица, состоящая из корректирующих векторов

Расчет СЛАУ цепочками



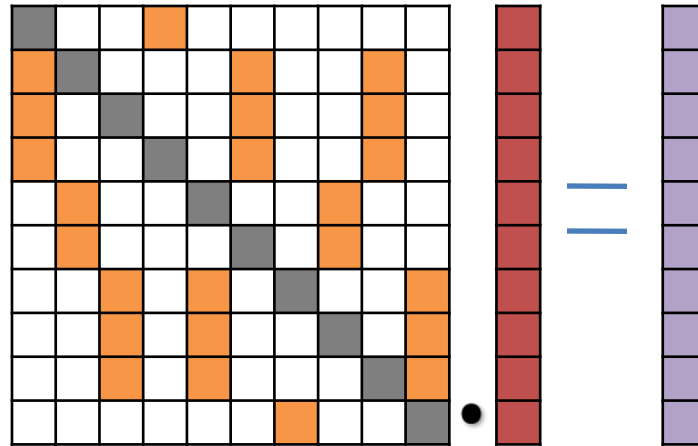
- Расчет каждой цепочки не зависит от расчета других цепочек, поэтому напряжения узлов цепочек могут быть рассчитаны одновременно
- Корректирующие вектора вычисляются путем замены вектора токов на вектор, содержащий проводимость добавляемой связи

Расчет СЛАУ цепочками



- Все связи должны быть добавлены одновременно т.к. только в этом случае число ненулевых элементов корректирующего вектора будет равно размеру цепочки, а не размеру исходной матрицы

Расчет СЛАУ цепочками



- Одновременное добавление всех связей между цепочками требует решения плотной матрицы размерностью равной числу добавляемых связей, поэтому число связей между цепочками должно быть минимально

Расчет СЛАУ цепочками

Время выполнения качественной реализации метода складывается из:

- времени копирования трех диагональной матрицы в кэш (shared memory) вычислителя
- Времени копирования плотной матрицы в кэш (shared memory) вычислителя

Из этого следуют ограничения, связанные с аппаратной частью современных графических процессоров размер плотной матрицы

Расчет СЛАУ цепочками

Эффективность метода ограничена аппаратными возможностями современных графических процессоров. Ограничения распространяются на размер эффективно решаемой плотной матрицы:

- Размер кэша (shared memory) вычислителя 16 кБ соответствует 4-м матрицам размером 32 узла
- Размер кэша (shared memory) вычислителя 48 кБ соответствует 3-м матрицам размером 64 узла

Методика эффективного расчета переходного процесса ЭЭС

Выводы по реализации метода:

На современной аппаратной базе графических процессоров можно эффективно считать сети из произвольного числа узлов. При условии что получившаяся в результате исключения радиальных ветвей сеть может быть представлена в виде произвольного числа цепочек, связанных не более чем 64-мя связями.

При этом общая эффективность расчетного метода будет в основном зависеть от того насколько эффективно будет реализована передача данных между составными частями:

- Методом параллельного исключения радиальных ветвей
- Методом параллельной прогонки для решения цепочек ветвей
- Методом решения плотной матрицы для добавления связей между цепочками
- Методом коррекции напряжений узлов цепочек при добавлении связей между цепочка

Методика эффективного расчета переходного процесса ЭЭС

Область применимости метода:

В отличие от современных систем моделирования режима ЭЭС в реальном времени, данный метод не использует обратной матрицы при расчете УУН в форме баланса токов, поэтому в нем отсутствуют ограничения на число узлов и число коммутаций. Коммутации в сети считаются по ходу расчета переходного процесса, а не до расчета, как в современных системах моделирования в реальном времени. Эти свойства метода позволяют использовать его для расчетов каскадного развития аварии ЭЭС в темпе процесса.

Спасибо за внимание!