

3. Технология формирования проводящего рисунка. Сайт разработчика печатных плат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pcbdesigner.ru/travlenie-pechatnykh-plat/tehnologiya-formirovaniya-provodyashhego-risunka.html>, свободный (дата обращения: 15.02.2022).

4. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2(36). – С. 45–50.

5. ГОСТ 53429–2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. Взамен ГОСТ 23751–2009. Введ. С 30. 06. 2010. – М.: Изд-во стандартов, 2009. – 3 с.

УДК 519.612

### **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА BLOCK-IDR(s) ПРИ МНОВОВАРИАНТНОМ АНАЛИЗЕ МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ**

***В.А. Ижболдина, студентка; А.Е. Максимов, ассистент***

*Научный руководитель С.П. Куксенко, проф. каф. ТУ, д.т.н.*

*Проект ГПО ТУ-1502. Вычислительная ЭМС*

*г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, vikaIzhboldina01@gmail.com*

Выполнено исследование по уменьшению вычислительных затрат на решение последовательности матричных уравнений, возникающей при многовариантном анализе многопроводных линий передачи, при использовании метода Block-IDR(s).

**Ключевые слова:** многопроводные линии передачи, диагональное предобуславливание, LU-предобуславливание, Block-IDR(s).

При анализе методом моментов многопроводных линий передачи (МПЛП) с числом сигнальных проводников  $m$  формируется  $m$  систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с одинаковой матрицей и разными правыми частями [1]. Поэтому для решения полученного матричного уравнения вида  $\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B}$  целесообразно использовать блочные версии итерационных методов, одним из которых является Block-IDR(s) [2]. Если необходим многовариантный анализ с  $N_{\text{var}}$  вариациями изменяемых параметров МПЛП, то требуется решать последовательность матричных уравнений  $\mathbf{A}_i\mathbf{X}_i = \mathbf{B}_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_{\text{var}}$ , где размер матрицы  $\mathbf{A} - N \times N$ , а  $\mathbf{X}$  и  $\mathbf{B} - N \times m$ ,  $N$  – число подынтервалов, полученных при сегментации границ МПЛП. Поэтому вычислительные затраты существенно возрастают. Полученные матрицы  $\mathbf{X}$  далее используются для вычисления матриц погонных параметров МПЛП, из которых самой вычислительно-затратной является матрица коэффициентов электростатической индукции (ёмкостная матрица  $\mathbf{C}$ ) [3].

Поэтому целью работы является исследование применения блочного итерационного метода Block-IDR(s) для уменьшения вычислительных затрат на многовариантный анализ МПЛП. Исследование проведено на МПЛП, поперечное сечение которой приведено на рис. 1. Значения ее геометрических параметров случайным образом изменялись в диапазонах (в мм):  $0,1 < s' < 2$ ;  $0,018 < t < 0,2$ ;  $0,1 < h < 2$ . Остальные геометрические параметры не изменялись и были приняты равными  $w = 1$  мм,  $d = 1$  мм, значение относительной диэлектрической проницаемости подложки принято равным  $\epsilon_r = 5$ .

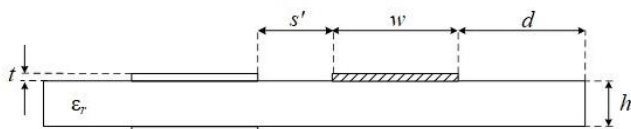


Рис. 1. Поперечное сечение исследуемой МПЛП

Рассмотрено 5 вариаций изменяемых параметров МПЛП и 2 метода вычисления: с использованием диагонального предобуславливания для каждого набора изменяемых параметров  $p$  и с использованием гибридного метода, в котором первое матричное уравнение решается методом Гаусса с использованием LU-разложения, а последующие – методом Block-IDR(s) с LU-предобуславливанием. Также исследовано влияние параметра  $s$  метода Block-IDR(s) на точность и время вычисления. Использовано нулевое начальное приближение при решении всей последовательности матричных уравнений. Размерность матриц СЛАУ оставалась неизменной и равной 1007. Формирование и решение последовательности матричных уравнений производилось в системе GNU Octave.

Исследовано два варианта изменения параметров: одновременное изменение двух параметров ( $t$  и  $h$ ), и трех параметров ( $t$ ,  $h$  и  $s'$ ), далее названные вариантами 1 и 2 соответственно. В табл. 1 приведены число итераций и различия в вычисленных нормах ёмкостных матриц  $C_{\text{iter}}$ , полученных итерационно, относительно метода Гаусса ( $C_{\text{GE}}$ ), по  $\Delta_F = \|C_{\text{GE}} - C_{\text{iter}}\|_F / \|C_{\text{GE}}\|_F$ , где  $\|\cdot\|_F$  – норма Фробениуса.

Из табл. 1 видно, что различия в матричных нормах составляют менее 1%, вне зависимости от значения параметра  $s$ , что говорит о высокой точности решения методом Block-IDR(s). Вариация параметра  $s$  приводит к изменению среднего числа итераций и общего времени решения всей последовательности матричных уравнений, что видно из табл. 2. Так, среднее число итераций незначительно увеличивается при увеличении числа изменяемых параметров (переход от варианта 1 к варианту 2) и уменьшается при увеличении параметра  $s$ . При

этом сокращение времени решения относительно метода Гаусса достигается только при использовании гибридного метода. Так, при  $s = 1$  экономия достигается для вариантов 1 и 2, при  $s = 2$  – только для варианта 1, а при  $s = 4$  экономия не достигается.

Таким образом, исследовано применение метода Block-IDR( $s$ ) для уменьшения вычислительных затрат на многовариантный анализ МПЛП. Удалось добиться сокращения затрат времени до 43% при сохранении высокой точности вычислений.

Таблица 1

**Число итераций и различия в матричных нормах, % (в скобках)  
для вариантов 1 и 2 при изменении параметров  $s$  и  $p$**

$s$	$p$	Диагональное предобусловливание		Гибридный метод	
		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2
1	1	14 (0,122)	19 (0,019)	5 (0,139)	5 (0,197)
	2	17 (0,052)	18 (0,239)	5 (0,005)	4 (0,071)
	3	17 (0,203)	24 (0,042)	2 (0,083)	5 (0,075)
	4	14 (0,047)	15 (0,033)	5 (0,116)	7 (0,006)
	5	16 (0,361)	11 (0,118)	3 (0,010)	3 (0,033)
2	1	10 (0,158)	11 (0,118)	6 (0,880)	4 (0,967)
	2	9 (0,117)	10 (0,230)	3 (0,084)	3 (0,258)
	3	10 (0,112)	21 (0,088)	2 (0,077)	6 (0,001)
	4	10 (0,258)	11 (0,077)	2 (0,001)	3 (< 0,001)
	5	13 (0,105)	10 (0,259)	3 (0,044)	3 (0,113)
4	1	8 (0,034)	6 (0,054)	2 (0,148)	2 (0,126)
	2	8 (0,021)	5 (0,079)	2 (0,016)	2 (0,036)
	3	5 (0,230)	9 (0,015)	1 (0,009)	3 (0,002)
	4	10 (0,019)	7 (0,003)	3 (0,010)	5 (0,006)
	5	6 (0,220)	10 (0,104)	1 (0,050)	4 (0,021)

Таблица 2

**Среднее число итерации и отношение общего времени решения методом  
Block-IDR( $s$ ) ко времени решения методом Гаусса (в скобках)  
для вариантов 1 и 2 при изменении параметра  $s$**

$s$	Вариант	Диагональное предобусловливание	Гибридный метод
1	1	15 (125,9)	4 (56,9)
	2	16 (157,4)	5 (67,9)
2	1	10 (210,5)	3 (80,5)
	2	12 (262,0)	3 (123,4)
4	1	8 (313,4)	2 (102,6)
	2	7 (297,8)	2 (121,4)

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2020-0039.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Krasnopolsky B. XAMG: A library for solving linear systems with multiple right-hand side vectors / B. Krasnopolsky, A. Medvedev // SoftwareX. – 2021. – Vol. 14. – P. 100695.
2. A block IDR(s) method for nonsymmetric linear systems with multiple right-hand sides / L. Du, T. Sogabe, B. Yu, Y. Yamamoto, S.-L. Zhang // Journal of computational and applied mathematics. – 2011. – Vol. 235. – P. 4095–4106.
3. Evaluation of quasi-static matrix parameters for multiconductor transmission lines using Gelarkin's method / M.B. Bazdar, A.R. Djordjevic, R.F. Harrington [et al.] // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1994. – Vol. 42, No. 7. – P. 1223–1228.

УДК 004.418

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТЕСТОВЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С МОДАЛЬНЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

*А.В. Гребенюк, А.В. Медведев, аспиранты*

*Научный руководитель Т.Р. Газизов, в.н.с. каф. ТУ, д.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, medart20@rambler.ru*

Спроектированы и изготовлены тестовые печатные платы (ПП) с модальным резервированием. Приведены поперечные сечения, эквивалентные схемы, шаблоны и фотографии изготовленных ПП.

**Ключевые слова:** печатная плата, модальное резервирование.

Важной задачей проектирования и изготовления радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является обеспечение надежности функционирования. Модальное резервирование (МР) – это подход к компоновке и трассировке резервируемых электрических межсоединений, при котором между резервируемой и резервной цепями образуется сильная электромагнитная связь [1]. Это позволяет осуществить защиту электрических цепей от сверхкороткого импульса (СКИ) за счет модальных искажений. Результатом является уменьшение излучаемых эмиссий от цепей с МР [2]. Для экспериментальной оценки излучаемых эмиссий от цепей с двукратным и трехкратным МР необходимо изготовить макеты ПП. Цель работы – спроектировать и изготовить тестовые ПП с двукратным и трехкратным МР.

Для измерения излучаемых эмиссий цепей с многократным МР необходимо разработать макеты тестовых печатных плат ПП, позволяющие провести это измерение в ТЕМ-камере. Общие ширина и высота ПП должны составлять 98 мм, а рабочее поле – 88 мм. Простейшим макетом для демонстрации модального разложения в цепях с многократным МР, которую можно поместить в ТЕМ-камеру, являет-