

УДК 621.311.25:621.039  
doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕЛОСТНОСТИ СИГНАЛА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СЛОЖНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

А. В. Григорьев<sup>1</sup>, Н. К. Юрков<sup>2</sup>, Е. Т. Ескибаев<sup>3</sup>, А. Г. Избасов<sup>4</sup>, М. Н. Байсеитов<sup>5</sup>

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>3,4,5</sup> Военный институт Сил Воздушной обороны имени дважды Героя Советского Союза Т. Я. Бегельдинова, Актобе, Казахстан

<sup>1</sup>a\_grigorev@mail.ru, <sup>2</sup>yurkov\_nk@mail.ru, <sup>3</sup>erbol.eskibaev\_26.04@mail.ru,  
<sup>4</sup>iag1973@mail.ru, <sup>5</sup>danikm755@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Все задачи по соблюдению целостности сигнала ложатся как на схемотехника, так и на трассировщика печатного узла. Задача схемотехника по решению вопроса целостности сигнала – знать ограничения высокоскоростного интерфейса. Задача трассировщика – знать и соблюдать правила проектирования высокоскоростных устройств. Для проектирования печатных узлов в настоящее время существует огромное множество программных пакетов. Очевидно, что новые задачи, которые встали перед проектировщиками печатных плат, не могли не найти отражения и в развитии САПР сложных измерительных систем. *Материалы и методы.* Если на первых этапах применение САПР для проектирования печатных плат ограничивалось топологическими задачами и технологическим сопровождением, то по мере того, как проблемы обеспечения целостности сигнала и электромагнитной совместимости становились более актуальными, ведущие производители САПР начали включать определенные процедуры и подсистемы в свою продукцию. Начало 2023 г. ознаменовалось выходом ряда новых версий популярных систем проектирования печатных плат. Часть из них претерпела незначительные изменения, часть была полностью обновлена, но все без исключения расширили свои возможности в направлении целостности сигнала и электромагнитной совместимости. *Результаты.* Различные электрофизические параметры печатного монтажа, эффекты от которых отрицательно влияют на целостность сигнала, приводят к тому, что процесс проектирования платы и печатного узла становится итерационным. Даже при применении виртуального прототипа необходим физический прототип, после испытаний которого в него вносятся определенные изменения. *Выводы.* Наличие виртуального прототипа сокращает срок и стоимость проектирования, но полностью устранить все недочеты можно только при тестировании реальной конструкции.

**Ключевые слова:** целостность сигнала, электрические параметры, сложные измерительные системы

**Для цитирования:** Григорьев А. В., Юрков Н. К., Ескибаев Е. Т., Избасов А. Г., Байсеитов М. Н. Исследование целостности сигнала и электрических параметров в сложных измерительных системах // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 11–21. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-2

## STUDY OF SIGNAL INTEGRITY WHEN MEASURING ELECTRICAL PARAMETERS IN COMPLEX ELECTRONICS SYSTEMS

A.V. Grigoriev<sup>1</sup>, N.K. Yurkov<sup>2</sup>, E.T. Eskibaev<sup>3</sup>, A.G. Izbasov<sup>4</sup>, M.N. Baiseitov<sup>5</sup>

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>3,4,5</sup> Military Institute of Air Defense Forces named after twice Hero of the Soviet Union T.Ya. Begeldinov, Aktobe, Kazakhstan

<sup>1</sup>a\_grigorev@mail.ru, <sup>2</sup>yurkov\_nk@mail.ru, <sup>3</sup>erbol.eskibaev\_26.04@mail.ru,  
<sup>4</sup>iag1973@mail.ru, <sup>5</sup>danikm755@gmail.com

**Abstract.** *Background.* All tasks for maintaining the integrity of the signal fall on both the circuit engineer and the tracer of the printed circuit assembly. The task of the circuit engineer in solving the problem of signal integrity is to know the limitations of the high-speed interface. The task of the tracer is to know and follow the rules for designing high-speed devices. For the design of printed circuit assemblies, there are currently a huge variety of software packages. It is obvious that the new tasks that faced the designers of printed circuit boards could not but be reflected in the development of CAD.

*Materials and methods.* If in the early stages the use of CAD for PCB design was limited to topological tasks and technological support, then as the problems of ensuring signal integrity and EMC became more relevant, leading CAD manufacturers began to include certain procedures and subsystems in their products. The beginning of 2023 was marked by the release of a number of new versions of popular PCB design systems. Some of them have undergone minor changes, some have been completely updated, but all, without exception, have expanded their capabilities in the direction of signal integrity and EMC. *Results.* Various electrophysical parameters of printed wiring, the effects of which negatively affect the integrity of the signal, lead to the fact that the process of designing the board and the printed circuit assembly becomes iterative. Even when using a virtual prototype, a physical prototype is needed, after testing which certain changes are made to it. *Conclusions.* The presence of a virtual prototype reduces the time and cost of design, but it is possible to completely eliminate all the shortcomings only when testing a real design.

**Keywords:** signal integrity, electrical parameters, complex measurement systems

**For citation:** Grigoriev A.V., Yurkov N.K., Eskibaev E.T., Izbasov A.G., Baiseitov M.N. Study of signal integrity when measuring electrical parameters in complex electronics systems. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):11–21. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-2

### *Введение*

Для моделирования электронной системы на этапе создания виртуального прототипа в основном используются пакеты прикладных программ. В них этапы схемотехнического моделирования и разработки топологии печатных плат или интегральных схем разделены. Сначала проводится моделирование электронных схем без учета паразитных эффектов, присущих реальным топологиям, а затем после разработки конструкции моделирование повторяется с их учетом. Эта процедура охватывает с той или иной полнотой задачи обеспечения целостности сигналов и электромагнитной совместимости (ЭМС).

Уровень развития современных САПР электронных средств открывает широкие возможности для разработчиков печатных плат. Наряду с комплексными системами проектирования (OrCAD, ACCEL EDA, P-CAD, Altium Designer, Mentor Graphics) на рынке информационных технологий широко представлены специализированные программные пакеты для анализа целостности сигналов и ЭМС: Signal Integrity, QUIET, Ansys, Mentor Hyperlinx и др [1]. Большинство из них являются дополнительными модулями к системам проектирования и имеют специальные интерфейсы для импорта проектов, а также для экспорта изменений, внесенных в проект, обратно в систему проектирования.

При проведении анализа эффектов на печатных платах разработчики часто приходят к выводу, что использование инструментов анализа целостности сигналов – это единственный способ исследования этих эффектов путем моделирования. Тем более, что большинство автоматизированных пакетов проектирования уже имеют встроенные модули – анализаторы целостности сигнала, например Mentor Hyperlinx.

Однако такие программные пакеты имеют весьма высокую цену на приобретение лицензии, что делает невозможным их покупку как для студентов или начинающих проектировщиков, так и для университета и предприятия. Следовательно, необходимо искать другие методы и программные пакеты для решения возникших во время проектирования задач.

### *Применение моделей для расчета погонной емкости*

Некоторые программные пакеты, цена которых не высока, не имеют встроенных анализаторов целостности сигнала, учитывающих электрофизические параметры печатного монтажа. Поэтому возникает задача использования сторонних программ для грамотного проектирования топологии печатной платы.

Такие программы часто встречаются в свободном доступе или же являются весьма дешевыми. Они представляют из себя средства для расчета таких параметров, как индуктивность, емкость, импеданс, волновое сопротивление. Однако при использовании таких программ возникает вопрос: насколько точным будет результат расчета? Не зная модель, которая применяется в тех или иных калькуляторах, трудно оценить точность полученных результатов, что может привести к некорректной работе устройства впоследствии.

Модели для расчета погонной емкости микрополосковой линии и анализ расчетов, полученных с их использованием, показали, что результаты могут как сильно расходиться друг от друга, так и быть достаточно точными [2]. Узнать, какая модель используется чаще всего,

не представляется возможным, поэтому к использованию сторонних программных средств во время проектирования нужно подходить весьма обстоятельно.

Расчеты моделей погонной емкости, представленные в данной работе, и сравнение их результатов помогут обойтись без использования сторонних программ для расчета этого параметра – достаточно выбрать самую подходящую модель.

**Выбор модели в зависимости от точности, сложности, диапазона входных параметров, ширины проводника, относительной диэлектрической проницаемости и толщины диэлектрика**

Для измерений использовалась печатная плата, основанием которой является материал Duroid 5880 компании Rogers Corporation. Данный материал разработан как альтернатива армированному фторопласту (PTFE) с низкой анизотропией коэффициента диэлектрической проницаемости. Малая диэлектрическая проницаемость делает их оптимальными для СВЧ устройств, где дисперсия и потери должны быть минимизированы. Благодаря малым характеристиками влагопоглощения материалы Duroid 5870 и 5880 нашли применение в условиях с высокой влажностью. По заявлению авторов, данный материал имеет самый низкий показатель электрических потерь, не требует специальных условий хранения в связи с малым поглощением влаги, а также имеет единые электрические свойства для очень широкого диапазона частот. Основные характеристики материала представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики Duroid 5880

Диэлектрическая постоянная, $\epsilon_r$ на частоте 10 ГГц	2,20 ± 1 %
Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10 ГГц	0,0015
Тепловой коэффициент расширения 50–150 °С, ppm/°С	–125
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,2
Толщина $h$ , мм	3,2

С одной стороны, основание печатной платы облицовано медью толщиной 35 мкм. С другой стороны, на плате размещены медные дорожки длиной 46 см, шириной от 0,038 до 69 мм и толщиной 35 мкм. Погрешность в измерении габаритов печатной платы составляет примерно ±2 %. Также автором эксперимента гарантируется погрешность измерения емкости < 1 % [3].

В табл. 2 представлены экспериментально измеренные значения емкости микрополосковой линии на частоте 1 кГц.

Таблица 2

Экспериментально измеренные значения емкости микрополосковой линии

Ширина $w$ , мм	Емкость $C_z$ , пФ/см
0,38	0,22
0,50	0,24
0,79	0,28
1,6	0,343
2,54	0,417
3,175	0,465
6,35	0,681
25,4	1,933
68,58	4,606

Опираясь на эти данные, из представленных можем выбрать те модели, результат которых будет максимально близок к реальным значениям.

**Результаты для модели Кауппа**

Для модели Кауппа результаты сведены в табл. 3, а также представлены на рис. 1.

Таблица 3

Результаты для модели Кауппа

$w$ , мм	$w/h$	$C$ , пФ/см	$C_3$ , пФ/см
0,38	0,118	0,232	0,22
0,5	0,157	0,248	0,24
0,79	0,244	0,279	0,28
1,6	0,469	0,35	0,34
2,54	0,787	0,421	0,41
3,175	0,984	0,468	0,465
6,35	1,969	0,71	0,681
25,4	7,874	-17,712	1,933
68,58	21,26	-0,902	4,606



Рис. 1. Результаты для модели Кауппа

Эта модель является довольно простой для расчета, однако, как видно из рис. 1, результаты сильно отклоняются от реальных, когда значение ширины проводника составляет 25,4 мм, что говорит о ее неуниверсальности, что является существенным недостатком при проектировании каких-либо САД-систем.

Ошибка данной модели на промежутке до ширины проводника 25,4 мм составляет 4,7 %.

#### Результаты для модели Шнайдера

Для модели Шнайдера результаты сведены в табл. 4, а также показаны на графике на рис. 2.

Таблица 4

Результаты для модели Шнайдера

$w$ , мм	$w/h$	$C$ , пФ/см	$C_3$ , пФ/см
0,38	0,118	0,222	0,22
0,5	0,157	0,24	0,24
0,79	0,244	0,273	0,28
1,6	0,469	0,349	0,34
2,54	0,787	0,424	0,41
3,175	0,984	0,471	0,465
6,35	1,969	0,682	0,681
25,4	7,874	1,891	1,933
68,58	21,26	4,529	4,606



Рис. 2. Результаты для модели Шнайдера

Данная модель является самой точной из всех описанных выше. Процент ошибки составляет всего 1,3 %.

**Результаты для модели Уэллера – Шнайдера**

Для модели Уэллера–Шнайдера результаты сведены в табл. 5 и представлены на графике на рис. 3.

Таблица 5

Результаты для модели Уэллера – Шнайдера

w, мм	w/h	C, пФ/см	C <sub>э</sub> , пФ/см
0,38	0,118	0,278	0,22
0,5	0,157	0,293	0,24
0,79	0,244	0,314	0,28
1,6	0,469	0,354	0,34
2,54	0,787	0,433	0,41
3,175	0,984	0,582	0,465
6,35	1,969	0,828	0,681
25,4	7,874	2,126	1,933
68,58	21,26	4,836	4,606

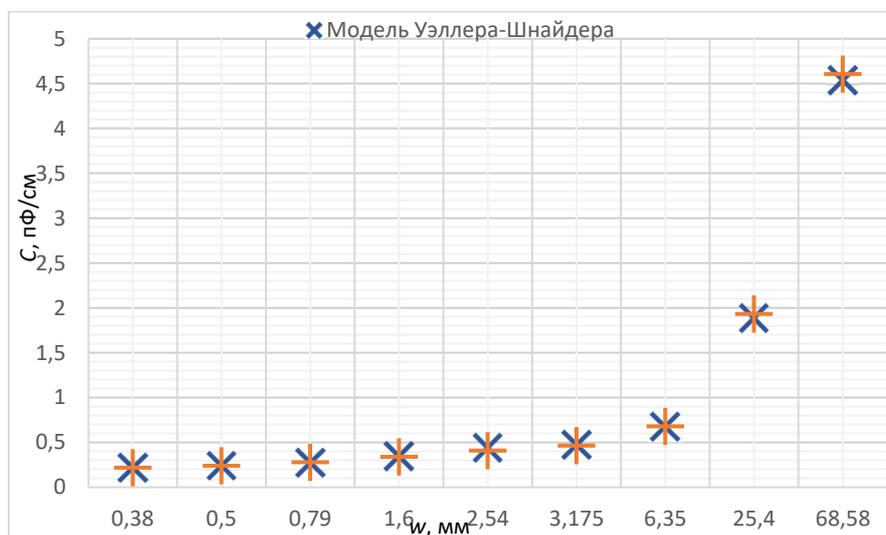


Рис. 3. Результаты для модели Уэллера – Шнайдера

Процент погрешности данной модели составляет 3,3 %.

### Результаты для модели Поха

Для модели Поха результаты представлены в табл. 6 и также на графике на рис. 4.

Таблица 6

#### Результаты для модели Поха

$w$ , мм	$W/h$	$C$ , пФ/см	$C_3$ , пФ/см
0,38	0,118	0,224	0,22
0,5	0,157	0,242	0,24
0,79	0,244	0,275	0,28
1,6	0,469	0,35	0,34
2,54	0,787	0,439	0,41
3,175	0,984	0,474	0,465
6,35	1,969	0,675	0,681
25,4	7,874	1,882	1,933
68,58	21,26	4,541	4,606

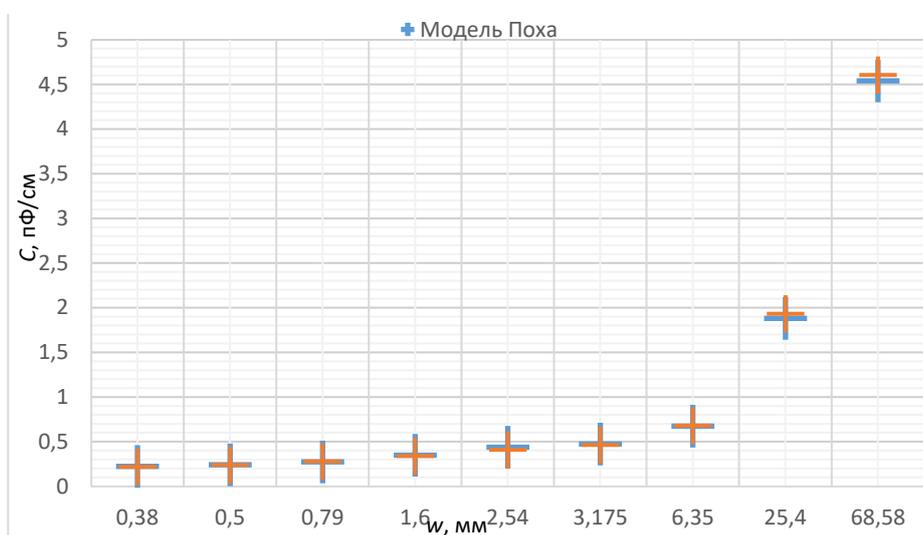


Рис. 4. Результаты для модели Поха

Как видно из табл. 6 и рис. 4, данная модель не сильно расходится с реальными значениями. Процент ошибки относительно измеренных значений согласно соотношению составляет 1,93 %.

### Результаты для модели Сакураи и Тамару

Для модели Сакураи и Тамару результаты сведены в табл. 7 и представлены на графике на рис. 5.

Таблица 7

#### Результаты для модели Сакураи и Тамару

$w$ , мм	$W/h$	$C$ , пФ/см	$C_3$ , пФ/см
0,38	0,118	0,213	0,22
0,5	0,157	0,221	0,24
0,79	0,244	0,241	0,28
1,6	0,469	0,297	0,34
2,54	0,787	0,363	0,41
3,175	0,984	0,407	0,465
6,35	1,969	0,627	0,681
25,4	7,874	1,951	1,933
68,58	21,26	4,951	4,606

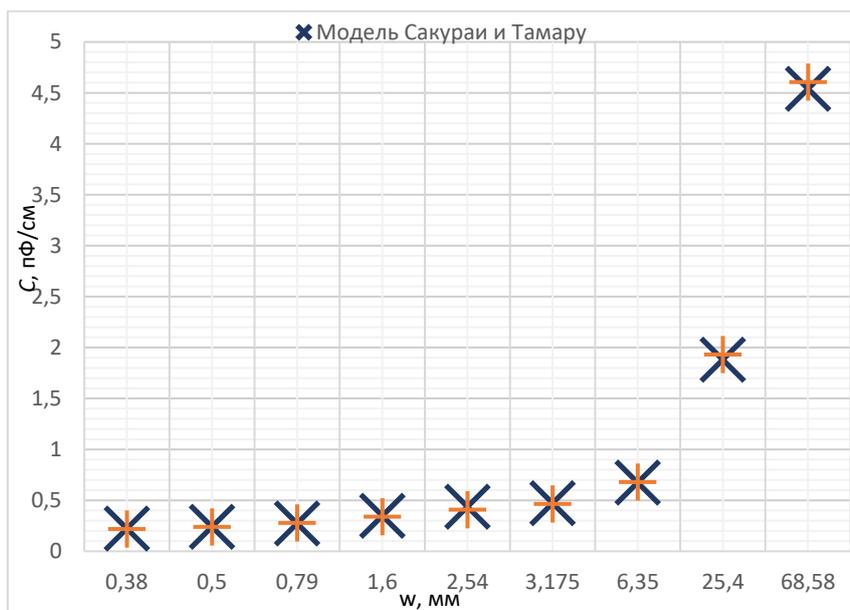


Рис. 5. Результаты для модели Сакураи и Тамару

Ошибка этой модели относительно экспериментальных данных составляет около 10 %.

**Результаты для модели Кумара**

Для модели Кумара результаты сведены в табл. 8 и представлены на графике на рис. 6.

Таблица 8

Результаты для модели Поха

w, мм	W/h	C, пФ/см	C <sub>3</sub> , пФ/см
0,38	0,118	0,184	0,22
0,5	0,157	0,19	0,24
0,79	0,244	0,204	0,28
1,6	0,469	0,245	0,34
2,54	0,787	0,293	0,41
3,175	0,984	0,325	0,465
6,35	1,969	0,485	0,681
25,4	7,874	1,448	1,933
68,58	21,26	3,63	4,606

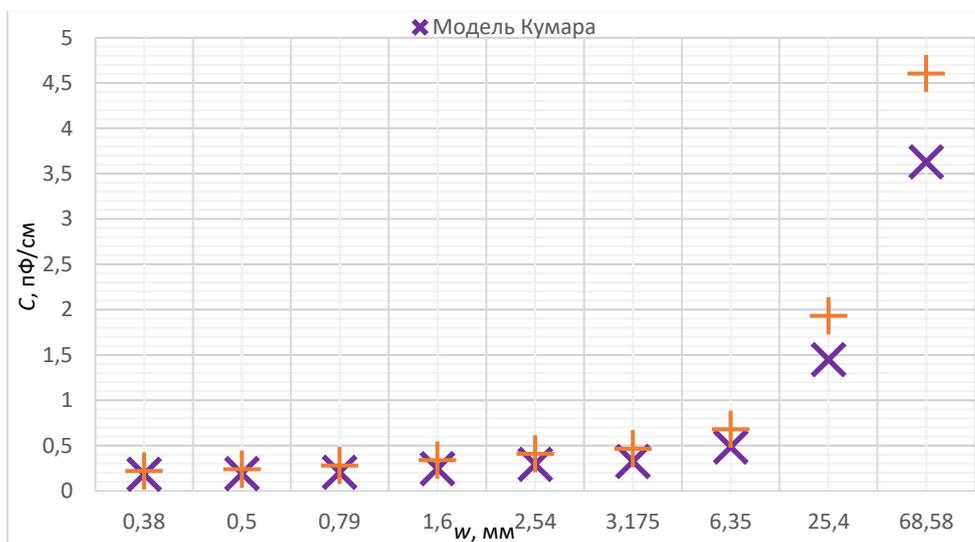


Рис. 6. Результаты для модели Кумара

Данная модель оказалась самой неточной из всех представленных. Процент погрешности составляет 28 %, что делает ее совершенно непригодной для использования.

### Сравнение моделей

Чтобы сравнить все модели между собой и выбрать самую адекватную для применения, их необходимо сравнить между собой. Для наглядности погрешности относительно экспериментальных данных для всех моделей сведены в табл. 9.

Таблица 9

Погрешности моделей расчета емкости микрополосковой линии

Модель	Погрешность, %
Модель Кауппа	4,7
Модель Шнайдера	1,3
Модель Уэллера – Шнайдера	3,3
Модель Поха и др.	1,93
Модель Сакураи и Тамару	10
Модель Кумара	28

Как видно, модель Сакураи и Тамару, а также модель Кумара оказались самыми неточными из всех описанных. Однако, чтобы грамотно оценить качество результатов, необходимо свести их в один график, что позволит отследить их отклонения относительно экспериментальных данных при всех значениях ширины проводника  $w$ .

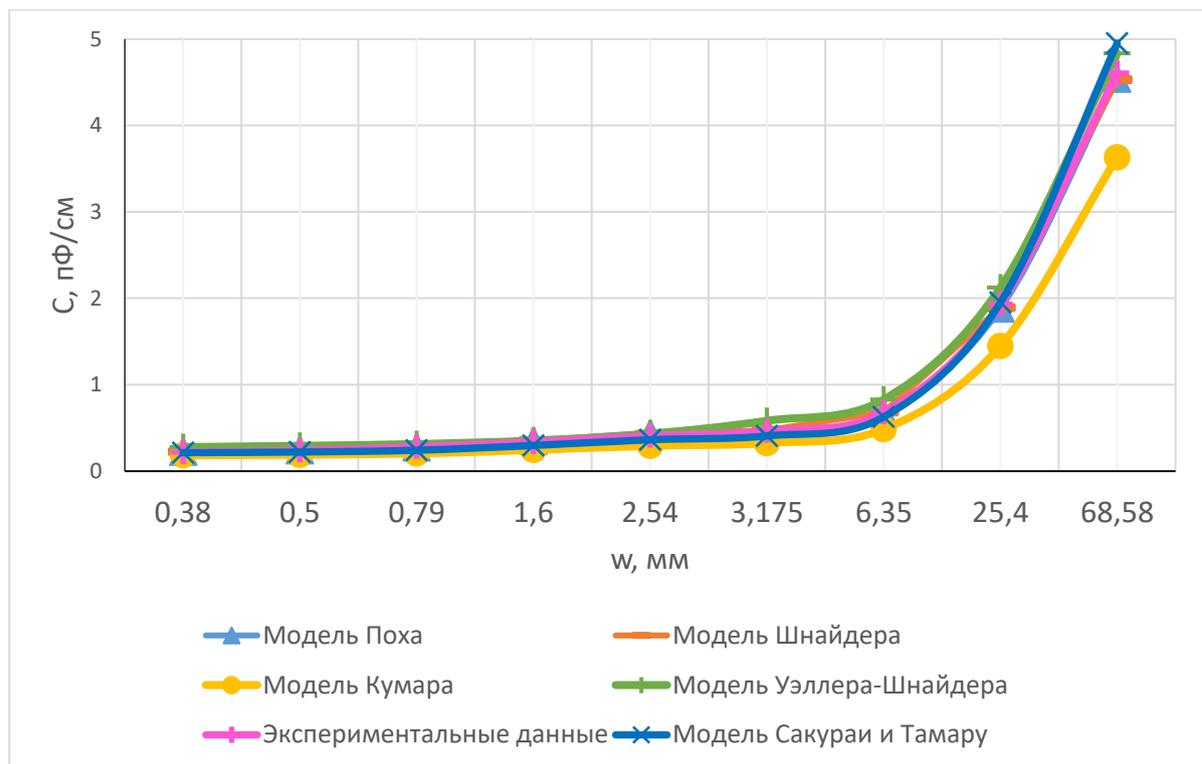


Рис. 7. Результаты расчета моделей относительно экспериментально измеренных значений

Анализируя рис. 7, который наглядно отражает результаты расчетов каждой модели относительно друг друга, видно, что при ширине проводника  $w < 6,35$  мм наблюдается минимальное расхождение результатов каждой модели друг от друга и от экспериментальных данных. Однако при большей ширине проводника  $w$  наблюдается значительный разброс данных.

Опираясь на данные на рис. 8, а также учитывая значения погрешностей результатов моделей относительно экспериментальных данных, представленных в табл. 9, можно сделать следующие выводы:

- при ширине проводника  $w \leq 6,35$  мм любая модель из представленных дает результат с хорошей точностью (до 10 %);
- для ширины проводника  $w > 6,35$  мм модель Кауппа совершенно непригодна для использования;
- при ширине проводника  $w > 6,35$  мм значения емкости, рассчитанной по модели Кумара, отклоняются в меньшую сторону от экспериментальных данных сильнее других, что приведет к ошибкам при последующих расчетах, что также делает ее непригодной для использования;
- модель Шнайдера является самой точной для любого значения ширины проводника  $w$ .

### *Заключение*

Развитие цифровых систем идет под знаком повышения быстродействия. На это направлены усилия разработчиков и изготовителей интегральных микросхем, системотехников и схемотехников, конструкторов и технологов электронных устройств и систем. Традиционно для относительно низкочастотной аппаратуры требовалось решить в основном топологические задачи по безошибочной трассировке печатного монтажа, а некоторые особенности функционирования платы оговаривал разработчик принципиальной схемы. При проектировании плат для быстродействующих систем таких оговорок накапливается слишком много, что исключает эффективную работу конструктора. Он должен быть сам достаточно квалифицирован для принятия технических решений в новой изменившейся ситуации, для ведения конструктивного диалога со схемотехником, а также для анализа результатов испытаний и измерений.

В данной работе было представлено исследование процессов, которые происходят в быстродействующей цифровой аппаратуре. Были оговорены основные виды помех, которые возникают в плохо спроектированном устройстве. Однако возникновение помех чаще всего связано с электрофизическими параметрами печатного монтажа. Разработчик платы должен понимать, что в быстродействующих устройствах любое изменение рисунка монтажа, ширины и длины проводников, диаметров металлизированных отверстий и других факторов приведет к изменению электрических и физических параметров монтажа (емкость, индуктивность, волновое сопротивление и др.), что скажется на качестве обработки сигнала. Иногда эти изменения мало заметны, но чем выше быстродействие, тем сильнее зависимость электрофизических параметров межсоединений от конструкции платы, и тем более обоснованы и продуманы должны быть решения. Одному из основных электрофизических параметров печатного монтажа было уделено основное внимание – погонная емкость. Были представлены модели, проведены расчеты, а также проведен их анализ между собой. Использование этих моделей может существенно помочь избежать ошибок, а также дает возможность не использовать сторонние программы для расчетов этого параметра.

### *Список литературы*

1. Рыбаков И. М. Модели и методы измерения электрических параметров в сложных системах электроники // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 44–50. doi: 10.21685/2307-4205-2023-2-5 EDN: MTOSWQ
2. Реута Н. С., Рыбаков И. М., Кошеленко П. Г., Володин В. Ю. К проблеме анализа средств измерения и их влияние на показатели надежности // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2022»): материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для обучающихся и молодых ученых (г. Пенза, 24–26 октября 2022 г.). Пенза: Изд-во ПГУ, 2022. С. 54–58. EDN: MUMWFY
3. Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К. [и др.] Дизъюнктивная модель инварианта состояния объекта контроля // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 106–113. doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-13 EDN: UQJHHJ
4. Рыбаков И. М., Лысенко А. В., Бростилов С. А., Герасимова Ю. Е. Информационно-измерительная и управляющая система теплофизического моделирования параметров электронной аппаратуры // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 2. С. 36–45. doi: 10.21685/2072-3059-2022-2-3 EDN: BJZNEH

5. Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Семочкина И. Ю. Методологии построения систем поддержки принятия решений в многоаспектной области применения // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 1. С. 18–22. EDN: GFONMS
6. Гришко А. К. Многокритериальное принятие проектных решений в условиях частичной неопределенности // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 1. С. 51–53. EDN: IJLTKF
7. Rybakov I. M. Information System for Measuring Thermophysical Parameters of Electronic Appliances Based on Temperature Field Models // 2022 19th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky, 2022. P. 50–53. doi: 10.1109/TSCZh55469.2022.9802495 EDN: TSCZh

### References

1. Rybakov I.M. Models and methods of measuring electrical parameters in complex systems of electronics. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):44–50. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-2-5 EDN: MTOSWQ
2. Reuta N.S., Rybakov I.M., Koshelenko P.G., Volodin V.Yu. On the problem of analysis of measuring instruments and their influence on reliability indicators. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii («Shlyandinskie chteniya – 2022»): materialy XIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. s elementami nauchnoy shkoly i konkursom nauchno-issledovatel'skikh rabot dlya obuchayushchikhsya i molodykh uchenykh (g. Penza, 24–26 oktyabrya 2022 g.) = Methods, means and technologies for obtaining and processing measuring information ("Shlyandinsky Readings – 2022") : materials of the XIV International Scientific and Technical conf. with the elements of the scientific school and the competition of research papers for students and young scientists (Penza, October 24-26, 2022)*. Penza: Izd-vo PGU, 2022:54–58. (In Russ.). EDN: MYMWFY
3. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. et al. Disjunctive model of the invariant of the state of the object of control. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(3):106–113. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-13 EDN: UQJHHJ
4. Rybakov I.M., Lysenko A.V., Brostilov S.A., Gerasimova Yu.E. Information-measuring and control system of thermophysical modeling of parameters of electronic equipment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2022;(2):36–45. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2022-2-3 EDN: BJZNEH
5. Mikheev M.Yu., Prokof'ev O.V., Semochkina I.Yu. Methodologies for building decision support systems in a multidimensional field of application. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2022;1:18–22. (In Russ.). EDN: GFONMS
6. Grishko A.K. Multi-criteria decision-making in conditions of partial uncertainty. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and quality*. 2021;1:51–53. (In Russ.). EDN: IJLTKF
7. Rybakov I.M. Information System for Measuring Thermophysical Parameters of Electronic Appliances Based on Temperature Field Models. *2022 19th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky*. 2022:50–53. doi: 10.1109/TSCZh55469.2022.9802495 EDN: TSCZh

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Алексей Валерьевич Григорьев

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: a\_grigorev@mail.ru

#### Aleksey V. Grigoriev

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of radio equipment design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: yurkov\_nk@mail.ru

#### Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,  
head of the sub-department of radio equipment  
design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Ербол Токтамысович Ескибаев**

начальник кафедры тактики авиации,  
Военный институт Сил воздушной обороны  
имени дважды Героя Советского Союза  
Т. Я. Бегельдинова  
(Казахстан, г. Актобе,  
пр-т Алии Молдагуловой 39)  
E-mail: erbol.eskibaev\_26.04@mail.ru

**Erbol T. Eskibaev**

Head of the sub-department of tactics of aviation,  
Military Institute of Air Defense Forces  
named after twice Hero  
of the Soviet Union T.Ya. Begeldinov  
(39 Aliya Moldagulova avenue, Aktobe, Kazakhstan)

**Аскар Гадылшиевич Избасов**

заместитель начальника,  
Военный институт Сил воздушной обороны  
имени дважды Героя Советского Союза  
Т. Я. Бегельдинова  
(Казахстан, г. Актобе,  
пр-т Алии Молдагуловой 39)  
E-mail: iag1973@mail.ru

**Askar G. Izbasov**

Deputy head,  
Military Institute of Air Defense Forces  
named after twice Hero  
of the Soviet Union T.Ya. Begeldinov  
(39 Aliya Moldagulova avenue, Aktobe, Kazakhstan)

**Мади Нуралиевич Байсеитов**

преподаватель,  
Военный институт Сил воздушной обороны  
имени дважды Героя Советского Союза  
Т. Я. Бегельдинова  
(Казахстан, г. Актобе,  
пр-т Алии Молдагуловой 39)  
(Казахстан, Алматинская обл., п. Жетыген)  
E-mail: danikm755@gmail.com

**Madi N. Bayseitov**

Teacher,  
Military Institute of Air Defense Forces  
named after twice Hero  
of the Soviet Union T.Ya. Begeldinov  
(39 Aliya Moldagulova avenue, Aktobe, Kazakhstan)  
(Zhetygen village, Almaty region, Kazakhstan)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 24.03.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 27.04.2023**

**Принята к публикации/Accepted 27.05.2023**