

УДК 621.37

Н.Л. Дембицкий, Фам Вьет Ань

## Учет влияния погрешностей технологического процесса на выход годных при изготовлении высокочастотных устройств на печатных платах

Рассматривается влияние погрешностей технологического процесса на выход годных при изготовлении высокочастотных устройств на печатных платах. Целью работы является создание методики расчета допусков на параметры межсоединений печатных плат быстродействующих узлов цифровой обработки информации, прогнозирование технологического брака, алгоритм расчета погрешностей волнового сопротивления от разброса геометрических размеров проводников.

**Ключевые слова:** высокочастотные устройства, печатная плата, волновое сопротивление, теория допусков, производственные погрешности.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-1-9-13

Современный этап создания узлов для цифровой обработки сигналов характеризуется значительным повышением быстродействия устройств, переходом к работе на высоких тактовых частотах. При работе схем с тактовыми частотами более чем 100 МГц или для фронта сигнала короче, чем 1 нс, следует принимать во внимание эффект целостности сигнала [1]. Параметры межсоединений на печатных платах (ПП) оказывают значительное воздействие на форму цифрового сигнала, приводя к его искажению.

При создании узлов современной РЭА чаще всего конструктор имеет дело с печатными проводниками, представляющими длинные линии. Электрически длинной называется линия, у которой погонная длина  $l_{\text{П}}$  не меньше 10–20% минимальной длины волны ( $l_{\text{П}} > \lambda_{\text{мин}} \cdot (0,1 \dots 0,2)$ ). Учет параметров длинных линий становится одной из главных задач проектирования печатных плат.

Современная практика разработки конструкций узлов на ПП использует методики, основанные на последовательном, циклическом подходе, в котором инженер-схемотехник и конструктор совместно решают задачу проектирования. Переход на более высокочастотные диапазоны приводит к необходимости включения в процесс проектирования специалистов по технологиям производства ПП, задачей которых является прогнозирование влияния производственно-технологических погрешностей на электрические параметры узлов после изготовления.

При промышленном изготовлении ПП, а также при их эксплуатации проявляются факторы, оказывающие дестабилизирующее воздействие на электрические параметры. Причины их возникновения различны. Прежде всего, это производственный процесс, вызывающий появление производственных погрешностей. Причиной появления дестабилизирующих факторов чаще всего может явиться отклонение размеров и расположения элементов конструкции ПП в результате нестабильности воспроизводимых технологическим процессом параметров изделия. В итоге параметры узла отличаются от расчетных значений, что сказывается на увеличении брака.

Факторы, определяющие конструктивно-технологические погрешности полосковых линий передачи, можно разделить на 4 группы [2]: погрешности геометрии, погрешности микрогеометрии, разброс электрических и магнитных параметров конструкционных материалов, погрешности формы.

- Погрешности геометрии включают: разброс по ширине и толщине проводника, разброс по толщине диэлектрика.

- Погрешности микрогеометрии вызваны шероховатостью и дефектами токонесущей поверхности.

- Разброс электрических и магнитных параметров конструкционных материалов включает: неравномерность свойств проводников и диэлектриков платы.

- Погрешности формы включают: нарушения параллельности проводников и нарушение формы сечения проводника относительно выбранной расчетной модели.

Все перечисленные погрешности являются погрешностями конструкции, и большинство из них зависит от технологического процесса производства.

Появление конструктивно-технологических погрешностей в полосковой линии ведет к изменению ее электрических параметров. Поскольку эти погрешности по своей природе случайные, то и изменения, вызванные ими, будут случайными.

Предметом дальнейшего рассмотрения является анализ степени влияния конструктивно-технологических погрешностей на важнейший электрический параметр полосковых линий передачи – волновое сопротивление.

На основе этих исследований могут решаться следующие задачи:

- 1) учет влияния конструктивно-технологических погрешностей на этапе разработки полоскового устройства и оптимизации конструкции;

- 2) определение границ применимости и обоснованности использования технологических процессов изготовления полосковых устройств и линий передачи при заданных допусках на их электрические параметры;

3) создание регулируемого технологического процесса, обеспечивающего оптимальные и воспроизводимые электрические параметры полосковых линий передачи и устройств на их основе;

4) выбор наиболее экономичного технологического процесса, обеспечивающего производство полосковых линий и устройств с заданными электрическими параметрами.

Технологические факторы, влияющие на погрешности печатных плат, показаны в табл. 1 [3]. Погрешность размеров печатных элементов  $\delta t$ ,  $\delta D$

является функцией следующих составляющих: погрешности размеров печатных элементов на фотошаблоне  $\delta t^{\text{ФШ}}$ ,  $\delta D^{\text{ФШ}}$ , изменения этих размеров на операциях получения защитного рельефа  $\delta t^{\text{ФХ}}$ ,  $\delta D^{\text{ФХ}}$ , травления меди  $\delta t^{\text{ТМ}}$ ,  $\delta D^{\text{ТМ}}$ , гальванического осаждения меди и покрытий  $\delta t^{\text{Г}}$ ,  $\delta D^{\text{Г}}$ , а также оплавления покрытия  $\delta t^{\text{ОП}}$ ,  $\delta D^{\text{ОП}}$ .

Предельные отклонения размеров элементов топологии фотошаблона в зависимости от класса точности ПП приведены в табл. 2.

Таблица 1

Технологические факторы, влияющие на погрешности печатных плат					
№ п/п	Параметр		Погрешность	Допуск	
	Наименование	Обозначение			
1	Ширина печатного проводника	$t$	$\delta t$	$\Delta t$	
2	Диаметр монтажного отверстия	$d$	$\delta d$	$\Delta d$	
3	Диаметр контактной площадки	$D$	$\delta D$	$\Delta D$	
Смещение относительно номинального положения:					
4	а) печатного элемента;	$\Delta_{\text{ПЭ}}$	$\delta P$	$\Delta P$	
5	б) монтажного отверстия	$\Delta_{\text{ПЭ}}$	$\delta r$	$\Delta r$	
6	Гарантийный поясок контактной площадки	$b$	$\delta b$	$\Delta b$	

Таблица 2

Предельные отклонения размеров элементов топологии фотошаблона в зависимости от класса точности ПП					
Класс точности ПП	1	2	3	4	5
Предельные отклонения размеров элементов топологии фотошаблона, мм	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,03$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$

Теоретические и экспериментальные исследования показывают [4]:

– каждая из перечисленных погрешностей зависит от значительного числа факторов систематического и случайного характера, что дает основание рассматривать эти погрешности как случайные величины;

– погрешности отдельных операций практически независимы между собой;

– между толщиной гальванически осаждаемых металлов (меди и покрытий)  $h^{\text{Г}}$  и погрешностью  $\delta t^{\text{Г}}$ ,  $\delta D^{\text{Г}}$  существует корреляционная зависимость.

Как отмечается в работе [5], плотность монтажа и общая площадь ПП в значительной степени зависят от выбранного класса точности. Переход к более высоким классам точности приводит к уменьшению длины проводников. А это в свою очередь дает возможность уменьшить задержки в сигнальных проводниках, снизив искажения сигналов, и повысить их целостность в проектируемой схеме.

С другой стороны, повышение класса точности объективно влияет на зависимости погрешностей параметров межсоединений на уход характеристик устройства от рассчитанных номинальных значений и приводит к ужесточению требований к допусковому контролю параметров ПП.

#### Расчет допусков на параметры межсоединений печатных плат быстродействующих узлов цифровой обработки информации

Одной из задач обеспечения целостности сигнала при проектировании платы является выполнение всех соединений в виде однородных линий передачи и минимизация длины всех неоднородных линий передачи. При конструировании печатных плат всегда имеется информация о параметрах сече-

ния сигнальных проводников, толщинах и параметрах изоляционных материалов и в целом о геометрии печатного монтажа и конструкции платы. Эти параметры учитываются при расчете волнового сопротивления линии.

Волновое сопротивление линии передачи – это тот параметр, который требует совместного обсуждения разработчика принципиальной схемы и конструктора печатной платы. Длинные линии передачи должны быть согласованы, для чего в схему вводятся согласующие резисторы. Если при изготовлении печатной платы линия передачи не будет иметь требуемого волнового сопротивления, то установка согласующих резисторов окажется бесполезной. Важно и допустимое отклонение волнового сопротивления от номинального значения.

В результате выполнения технологических операций происходят случайные отклонения значений параметров линий передачи от номинальных. Это приводит к погрешностям значений волнового сопротивления относительно номиналов, просчитанных разработчиками ПП.

Остановимся на разработке методов учета влияния вносимых производственно-технологических погрешностей на погрешности волнового сопротивления.

При конструировании печатных плат используется информация о параметрах сечения сигнальных проводников, толщинах и параметрах изоляционных материалов и в целом о геометрии печатного монтажа и конструкции платы. Печатный монтаж ввиду специфики сечения проводников может быть рассчитан только с помощью методов конформных преобразований или численными методами [1].

Аппроксимация в виде приближенных аналитических соотношений может заменить при определенных допущениях применение программных средств моделирования. При необходимости непосредственного вычисления волнового сопротивления можно воспользоваться сводкой расчетных формул для линий передач в печатных платах, которая представлена в [7–10].

Рассмотрим пример аналитического выражения волнового сопротивления через параметры сечения линии микрополосковой линии проведенной на поверхности печатной платы (рис. 1):

$$Z = \frac{60}{\sqrt{0,47\varepsilon_r + 0,67}} \ln \left[ \frac{4h_{ms}}{0,67(0,8w+t)} \right], \quad (1)$$

где волновое сопротивление  $Z$  является функцией геометрических параметров  $h_{ms}$  – толщины платы;  $w$  – ширины проводника;  $t$  – толщины металлизации и диэлектрической проницаемости платы  $\varepsilon_r$ .

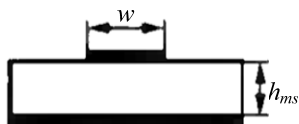


Рис. 1. Микрополосковая линия

Согласно теории допусков [6], если получено аналитическое выражение для выходного параметра  $N$  через параметры элементов  $y_1, y_2, \dots, y_n$ :  $N = f(y_1, y_2, \dots, y_n)$ , то относительная погрешность выходного параметра может быть рассчитана с помощью выражения

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial y_i}, \frac{y_i}{f} \right] \cdot \frac{\Delta y_i}{y_i}. \quad (2)$$

Это уравнение погрешностей является исходным для расчета допусков. Левая часть уравнения представляет собой относительную погрешность выходного параметра радиоизделия, а правая – относительные погрешности параметров элементов радиоизделия. Член уравнения в квадратных скобках называется коэффициентом влияния параметра  $y_i$ , который обозначен  $A_i = \left[ \frac{\partial f}{\partial y_i}, \frac{y_i}{f} \right]$ .

Ниже рассчитываются только производственные погрешности выходного параметра в зависимости от допусков на параметры элементов конструкции печатной платы. В качестве важнейшего параметра в расчетах длинных линий чаще всего фигурирует волновое сопротивление  $Z$ .

Погрешность волнового сопротивления, как случайная величина, характеризуется математическим ожиданием

$$M \left( \frac{\Delta Z}{Z} \right) = \sum_{i=1}^n A_i M \left( \frac{\Delta y_i}{y_i} \right), \quad (3)$$

и ширины поля допуска выходного параметра (волнового сопротивления)

$$\partial \left( \frac{\Delta Z}{Z} \right) = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \cdot \partial^2 \left( \frac{\Delta y_i}{y_i} \right)}, \quad (4)$$

Для упрощения выкладок дальше предположим, что математическое ожидание погрешностей всех параметров равно 0.

Аналитические выражения для расчета коэффициентов влияния получены с помощью (2):

$$A_\varepsilon = \frac{\partial Z}{\partial \varepsilon_r} \cdot \frac{\varepsilon_r}{Z} = -\frac{0,47\varepsilon_r}{2(0,47\varepsilon_r + 0,67)}, \quad (5)$$

$$A_{h_{ms}} = \frac{\partial Z}{\partial h_{ms}} \cdot \frac{h_{ms}}{Z} = \left[ \ln \left( \frac{4h_{ms}}{0,67(0,8w+t)} \right) \right]^{-1}, \quad (6)$$

$$A_w = \frac{\partial Z}{\partial w} \cdot \frac{w}{Z} = -\frac{0,8w}{0,8w+t} \left[ \ln \left( \frac{4h_{ms}}{0,67(0,8w+t)} \right) \right]^{-1}, \quad (7)$$

$$A_t = \frac{\partial Z}{\partial t} \cdot \frac{t}{Z} = -\frac{t}{0,8w+t} \left[ \ln \left( \frac{4h_{ms}}{0,67(0,8w+t)} \right) \right]^{-1}. \quad (8)$$

Уравнение относительной погрешности для волнового сопротивления в этом случае будет

$$\frac{\Delta Z}{Z} = A_\varepsilon \frac{\Delta \varepsilon_r}{\varepsilon_r} + A_{h_{ms}} \frac{\Delta h_{ms}}{h_{ms}} + A_w \frac{\Delta w}{w} + A_t \frac{\Delta t}{t}. \quad (9)$$

### Алгоритм расчета погрешностей волнового сопротивления от разброса геометрических размеров проводников

Проектирование прецизионных ПП для быстродействующих устройств требует не только расчета параметров конструкции соединений, но и учета влияния технологических погрешностей ширины проводников, зазоров между элементами рисунка соединений, толщины технологических слоев. Так, сейчас, когда ширина проводников становится соизмеримой с их высотой (30–50 мкм) или даже меньше ее, боковой подтрав оказывает влияние не только на геометрические размеры проводников, но и на электрические параметры линии связи.

Существующие программы моделирования СВЧ-соединений на ПП дают возможность получать математические модели соединений, с высокой точностью отражающие влияние геометрических параметров линий связи на физические процессы в схеме (рис. 2). В то же время в них, как правило, отсутствует допусковый контроль отклонений параметров соединений от номиналов. Ниже рассмотрим алгоритм расчета допусков на геометрические размеры проводников, который позволит прогнозировать параметры брака для технологических процессов изготовления ПП для узлов быстродействующих цифровых и СВЧ-схем.

Как показано выше (4), поле допуска рассчитывается как корень квадратный из суммы квадратов допусков на погрешности параметров.

При этом рассматриваются распределения погрешностей  $\Delta q/q$ , и получается значение отклонения  $\Delta Z/Z$  на уровне  $6\sigma$ . Если из требований к конструкции проектируемого узла поле допуска волнового сопротивления  $\delta(\Delta Z/Z)$ , то значение вероятности выхода за пределы поля допуска равно площади под кривой распределения в интервалах  $\pm \delta(\Delta Z/Z + \infty)$  (рис. 3).

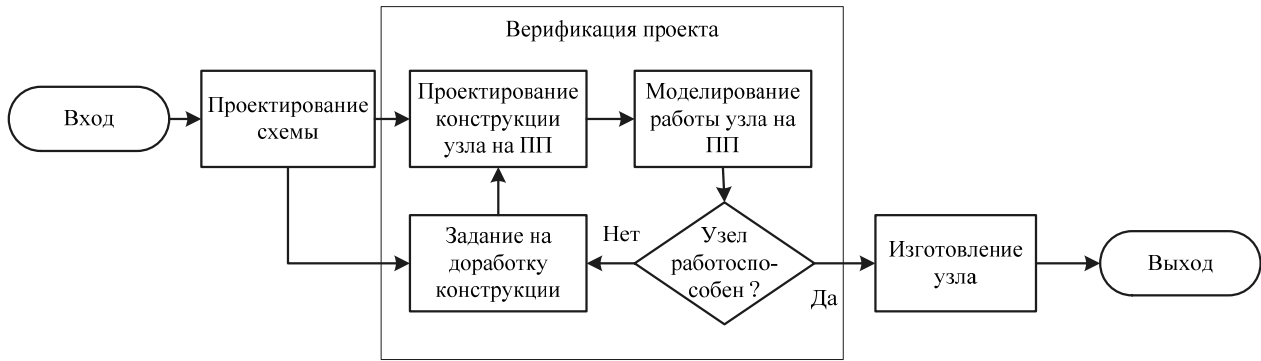


Рис. 2. Традиционный подход к проектированию узлов на ПП

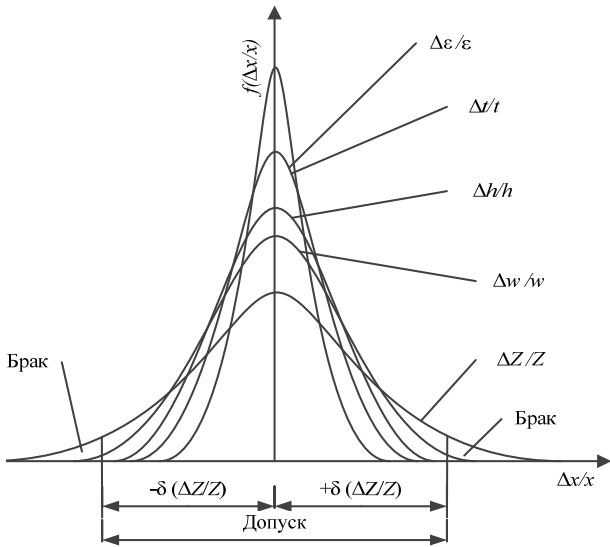


Рис. 3. Законы распределения погрешностей конструкции проводников ПП

Как известно, если на некоторый процесс оказывает влияние большое число независимых равноправных случайных факторов, распределенных равномерно, то сам процесс подчиняется закону распределения Гаусса, или нормальному закону распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (10)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение;  $\mu$  – математическое ожидание отклонения (можно принять  $\mu = 0$ ).

В данном случае  $x$  – отклонение параметра от номинального значения. Вероятность попадания случайной величины  $x$  в заданный диапазон  $(-\delta x, +\delta x)$  равна интегралу  $f(x)$  по данному диапазону:

$$P(\delta x^- < x < \delta x^+) = \int_{\delta x^-}^{\delta x^+} f(x) dx, \quad (11)$$

Вероятность брака рассматривается, как обратная величина:

$$Q(x < \delta x^- \text{ и } x > \delta x^+) = 1 - P(\delta x^- < x < \delta x^+) = 1 - \int_{\delta x^-}^{\delta x^+} f(x) dx, \quad (12)$$

Или, выражая вероятность через функцию Лапласа, получим:

$$Q(x < \delta x^- \text{ и } x > \delta x^+) = 2\Phi(-\delta x). \quad (13)$$

Рассмотрим всю совокупность проводников  $\Gamma = \bigcup_{i=1}^n \gamma_i$  устройства на ПП, критичных к значениям волнового сопротивления  $Z$ . Пусть  $q_i$  – вероятность превышения значения допуска на волновое сопротивление  $Z_i$  проводника  $\gamma_i$ . Тогда вероятность брака по отклонению волнового сопротивления будет

$$Q = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i). \quad (14)$$

Представленные аналитические выражения позволяют при проектировании ПП для СВЧ и быстродействующих цифровых устройств учитывать погрешности производства. Появляется возможность повышать надежность изделий и снижать на стадии технологической подготовки производства количество бракованных изделий. На рис. 4 показана последовательность решения задач создания устройств на ПП, при которой выполняется прогнозирование уровня брака с помощью расчета параметрических погрешностей производства межсоединений.

В процесс проектирования включен цикл проверки и прогнозирования допусков. После выбора технологического процесса определяются погрешности параметров оборудования и материалов. Затем выполняется расчет допусков на выходные параметры (волновое сопротивление). В случае невыполнения требований по допускам технологический процесс подвергается коррекции.

**Заключение**

1. Параметры межсоединений в ПП оказывают значительное воздействие на форму цифрового сигнала, приводя к его искажению. Постоянно растет потребность в производстве печатных плат с контролируемым импедансом. Изготовление ПП с заданными параметрами становится главной задачей при технологической подготовке производства.

2. Рассмотрены подходы к прогнозированию параметров производства ПП с позиций обеспечения необходимых электрических параметров. Получены аналитические зависимости между погрешностями производственных параметров ПП и электрическими характеристиками устройств на ПП, которые необходимо учитывать при технологической подготовке производства ПП.

3. На основе полученных аналитических зависимостей разработана методика и алгоритм расчета показателей качества технологических процессов изготовления ПП, в которых осуществляется про-

гнозирование оценок выхода бракованных изделий и выбор оптимальных вариантов технологического процесса по соответствию требований допустимых погрешностей волнового сопротивления ПП.

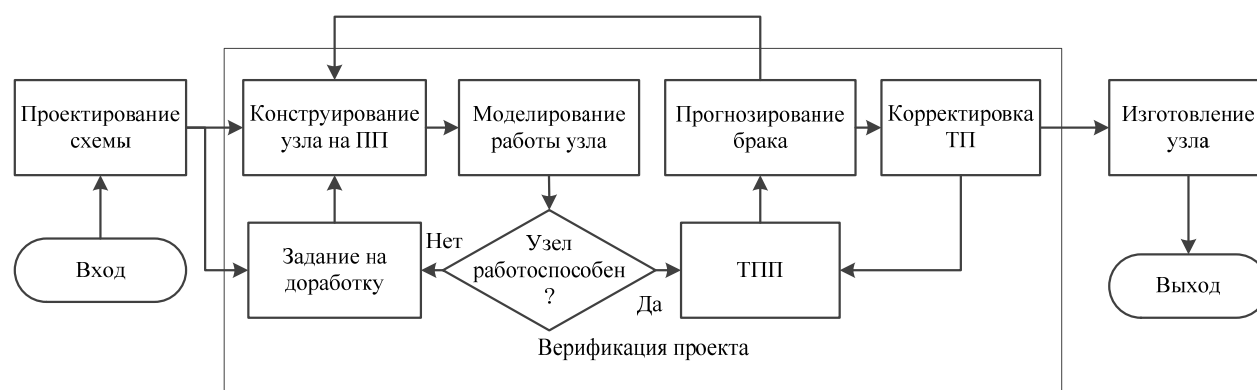


Рис. 4. Проектирование ПП с учетом ограничений по допуску

#### Литература

1. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л.Н. Кечиев. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.
2. Бушминский И.П. Конструирование и технология пленочных СВЧ-микросхем / И.П. Бушминский, Г.П. Морозов. – М.: Сов. радио, 1978. – 144 с.
3. Медведев А. Печатные платы. Конструкции и материалы / А. Медведев. – М.: Техносфера, 2005. – 304 с.
4. Иевлев В.И. Анализ точности производства электронных средств: учеб. пособие / В.И. Иевлев. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2010. – 103 с.
5. Медведев А. Плотность межсоединений электронных компонентов / А. Медведев, В. Можаров // Печатный монтаж. – 2011. – №3 (00032). – С. 140–145.
6. Фомин А.В. Допуски в радиоэлектронной аппаратуре / А.В. Фомин и др. – М.: Сов. радио, 1973. – 128 с.
7. Patel G. Signal Integrity Characterization of Printed Circuit Board Parameters / G. Patel, K. Rothstein. – Teradyne (NYSE: TER), based in North Reading, Massachusetts, US, 2002. – 8 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=18C766587515AF84ED9E6562E8436D2C?doi=10.1.1.124.3328&rep=rep1&type=pdf>
8. Brooks D. PCB Impedance Control: Formulas and Resources. Printed Circuit Design Magazine / D. Brooks. – Miller Freeman, 1998. – 4 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ultracad.com/articles/formula>.
9. Burkhardt A.J. Calculation of PCB Impedance / A.J. Burkhardt, C.S. Gregg, J.A. Sianiforth. – Circuit World, Vol. 26, Iss. 1. P. 6–10 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.polarinstruments.com/support/cits/IPC1999.pdf>
10. IPC-2141. Controlled Impedance Circuit Board and High Speed Logic Design. – Institute for Interconnecting and

11. Packaging Electronic Circuits, 1996. – 70 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dynamixtechnology.com/docs/ipc-2141s.pdf>

#### Дембицкий Николай Леонидович

Канд. техн. наук, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ)  
Тел.: +7-964-706-71-41  
Эл. почта: [ndembitsky@gmail.com](mailto:ndembitsky@gmail.com)

#### Фам Вьет Ань

Аспирант МАИ  
Тел.: +7-929-678-66-42  
Эл. почта: [phamvietanhqs@gmail.com](mailto:phamvietanhqs@gmail.com)

Dembitsky N.L., Pham Viet Anh

#### Calculating the impact of the technical process tolerance on productivity of manufacturing high-frequency equipment on printed circuit boards

The article studies the impact of technical process tolerance in manufacturing the high-frequency equipment on the printed circuit. The purpose of the study is to develop the method to calculate the acceptable tolerance of the parameters of the PCB interconnection of high-speed digital information processing units, forecast the technical substandard products, algorithms to calculate tolerance of impedance caused by conductor size tolerance.

**Keywords:** high-frequency equipment, PBC, impedance, theory of the acceptable tolerance, tolerance.