

18. *Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Belevtsev A.A. Metodika otsenki vremeni i stoimosti realizatsii tekhnologicheskikh trendov v usloviyakh neopredelennosti i nepolnoty informatsii* [Methodology for estimating the time and cost of implementing technological trends in conditions of uncertainty and incompleteness of information], *Naukoemkie tekhnologii* [Science-intensive technologies], 2019, No. 5.
19. *Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Belevtsev A.A., Sadreev F.G. Razrabotka intellektual'nykh servisov monitoringa tekhnologicheskikh trendov v informatsionno-analiticheskikh kompleksakh* [Development of intelligent services for monitoring technological trends in information and analytical complexes] *Naukoemkie tekhnologii* [Science-intensive technologies], 2019, Vol. 20, No. 3, pp. 24-29.
20. *Balyberdin V.A., Belevtsev A.M., Belevtsev A.A. O kolichestvennoy otsenke innovatsionnykh projektov* [On the quantitative assessment of innovative projects], *Izbrannye nauchnye trudy. XV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Upravlenie kachestvom»* [Selected Scientific Works. XV International Scientific and Practical Conference "Quality Management"]. Moscow: MAI, 2016, pp. 75-79.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Кравченко.

Белевцев Андрей Андреевич – ПАО «Сбербанк»; e-mail: andrey.belevtsev@gmail.com; г. Москва, Россия; старший вице-президент.

Белевцев Андрей Михайлович – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79037691788; д.т.н.; профессор.

Балыбердин Валерий Алексеевич – 3 Центральный научно-исследовательский институт МО РФ; e-mail: balyberdinvaleri@yandex.ru; г. Москва, Россия; д.т.н., профессор; заслуженный деятель науки РФ; в.н.с.

Belevtsev Andrey Andrevich – PJSC "Sberbank"; e-mail: andrey.belevtsev@gmail.com; Moscow, Russia; senior vice president.

Belevtsev Andrey Mikhaylovich – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79037691788; dr. of eng. sc.; professor.

Balyberdin Valeriy Alexeevich – 3 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: balyberdinvaleri@yandex.ru; Moscow, Russia; dr. of eng. sc.; professor; Honored Scientist of the Russian Federation; leading researcher.

УДК 519.688

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-64-74

А.В. Хлуденев

СИНТЕЗ ДОПУСКОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

*Задача назначения допусков дискретных пассивных элементов аналоговых устройств важна при планировании массового серийного производства. Допустимые отклонения параметров от номинальных значений влияют на стоимость, выбор рядов предпочтительных номинальных значений параметров и доступность приобретения этих комплектующих. Значения допусков, а также температурная зависимость параметров элементов и их изменение при старении являются ключевыми факторами, влияющими на работоспособность продукции и выход годных изделий. Решению этой задачи уделяется внимание в научно-технической литературе на протяжении более 40 лет. За это время изменились инструменты для проектирования электронных устройств. Стали широко применяться системы автоматизированного проектирования (САПР) для электроники (англ. *electronic design automation (EDA)*), обеспечивая сквозной цикл проектирования. Современные EDA имеют ограниченные возможности для допускового проектирования, обеспечивая решение задачи допускового анализа. Пользователям EDA приходится определять допуски элемен-*

тов на основе своей интуиции и опыта, посредством трудоемкой интерактивной оптимизации. Использование специализированных программных инструментов для определения допусков без интеграции с EDA профессионального уровня не является приемлемым решением. Целью исследования является обоснование решений для синтеза допусков элементов в цикле сквозного проектирования в среде EDA. В статье рассматриваются методы синтеза допусков, использующие результаты анализа чувствительности. Чувствительности можно определить, используя стандартные инструменты EDA. Рассмотрена реализация этих методов в среде табличного процессора Excel. Для обмена данными между электронной таблицей и базами данных схемы в EDA предложено использовать буфер обмена. Предложенные решения позволяют сократить количество интерактивных операций и затраты времени при назначении допусков. Приведен пример выполнения допускового проектирования аналогового устройства в среде EDA.

Дискретные пассивные элементы; допуски; выход годных изделий; запас работоспособности; система автоматизированного проектирования; инструмент измерения; анализ чувствительности; метод наихудшего случая; статистический метод; электронная таблица.

A.V. Khludenev

TOLERANCE SYNTHESIS BASED ON SENSITIVITY ANALYSIS

The tolerance allocation for passive discrete elements of analog devices is an important task when planning mass serial production. Permissible deviations from rated values affects on the cost, the choice of preferred number series for parameters and the acquisition availability of these components. The element tolerances, as well as the temperature dependence and aging effects, are the key factors affecting the product performances and the yield. The solution of this problem has received attention in the scientific and technical literature for more than 40 years. During this time, the tools for designing electronic devices have changed. Computer-aided design (CAD) systems for electronics - Electronic Design Automation (EDA) have become widely used, providing an end-to-end design flow. Modern EDAs have limited capabilities for tolerance design, providing a solution to the problem of tolerance analysis. EDA users have to determine element tolerances based on their intuition and experience through time-consuming interactive optimization. Using specialized tolerance software tools without integration with professional grade EDA is not an acceptable solution. The purpose of the study is to substantiate decisions for the tolerance synthesis in the end-to-end design flow in the EDA environment. The article discusses methods for determining tolerances using the results of sensitivity analysis. Sensitivities can be obtained using standard EDA tools. The implementation of these methods in the Excel environment is considered. To exchange data between the spreadsheet and the EDA schematic databases is proposed to use the clipboard. The proposed solutions make it possible to reduce the number of interactive operations and time spent when tolerance allocation. An example of analog device tolerance design in the EDA environment is given.

Discrete passive elements; tolerances; production yield; operability margin; computer-aided design; measurement instrument; sensitivity analysis; worst case method; statistical method; spreadsheet.

Введение. Дискретные пассивные компоненты остаются массовыми комплектующими в производстве электронных устройств. Это конденсаторы большой емкости, резисторы с высоким сопротивлением и рассеиваемой мощностью, которые сложно реализовать в виде элементов интегральных схем. Еще сложнее реализовать в интегральном исполнении катушки индуктивности и трансформаторы. Характеристики аналоговых устройств, построенных на интегральных операционных усилителях, определяются параметрами внешних пассивных элементов. В этих случаях часто приходится применять точные пассивные элементы. Применение интегральных аналоговых интерфейсов (англ. analog front end (AFE)) также не позволяет полностью отказаться от использования точных пассивных компонентов.

Допуски пассивных элементов определяют допускаемые отклонения фактических значений сопротивления, емкости, индуктивности от их номинальных значений. Стандартные значения допусков для резисторов устанавливает [1]. Для

конденсаторов постоянной емкости стандартные значения допусков определены в [2]. Этот стандарт также устанавливает ряды предпочтительных номинальных значений для резисторов и конденсаторов. Стандартные значения допусков и коды их маркировки для резисторов и конденсаторов приведены в [3]. Себестоимость производства более точных элементов существенно выше, так как приходится выполнять технологические операции индивидуальной подгонки и разбраковки по группам допусков. Необоснованное применение высокоточных элементов может привести к существенному завышению стоимости комплектующих и снижению конкурентоспособности продукции. Применение компонентов с завышенными допусками приводит к снижению выхода годных изделий. Назначение оптимальных допусков для дискретных пассивных элементов является целью синтеза допусков.

Разработку современных электронных устройств невозможно представить без использования EDA. Пик публикационной активности по тематике допускового проектирования в области электроники приходится на 70–80 годы 20 века [4–7]. Однако инструменты современных EDA позволяют получать лишь оценки разброса выходных параметров и прогнозировать выход годных изделий для назначенных допусков элементов. Задача автоматизации синтеза допусков пассивных элементов продолжает оставаться актуальной [8–14]. В работе [15] обсуждаются вопросы интеграции программ для расчета допусков с системами EDA. В работе [16] предложена инженерная методика допускового проектирования активных RC-фильтров на основе инструментов системы OrCAD PSpice Designer v.17.2 [17]. Практический интерес представляет реализация средств синтеза допусков пассивных элементов, интегрированных с инструментами EDA.

Формализация задачи. Основные свойства аналоговых устройств характеризуются значениями выходных параметров $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$. Технические требования формулируются в виде ограничений на допустимые значения Y . Рассмотрим задачу синтеза допусков в простейшей постановке, когда заданы требования в одной из форм:

$$y_{min} \leq y(\mathbf{X}) \leq y_{max}, \quad (1)$$

$$y(\mathbf{X}) \leq y_{max}, \quad (2)$$

$$y(\mathbf{X}) \geq y_{min}, \quad (3)$$

где y_{min} минимальное и y_{max} максимальное допустимые значения выходного параметра y , $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ параметры элементов устройства.

Ограничения вида (1)–(3) в пространстве параметра y формируют область работоспособности. Область работоспособности можно отобразить в пространство параметров \mathbf{X} , чтобы сформировать область приемлемости. Фактические значения параметров элементов \mathbf{X} распределяются случайным образом около их номинальных значений $\mathbf{X}_0 = \{x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0m}\}$ в пределах абсолютных производственных допусков $\Delta x_{max i}$:

$$x_{0i} - \Delta x_{max i} \leq x_i \leq x_{0i} + \Delta x_{max i}. \quad (4)$$

Система неравенств вида (4) для всех элементов \mathbf{X} определяет допусковую область. Необходимо определить относительные допуски $\mathbf{T} = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, где $t_i = (\Delta x_{max i} / x_{0i}) \cdot 100\%$, для которых допусковая область находится в пределах области приемлемости. Частичный выход допусковой области за границы области приемлемости приводит к снижению выхода годных изделий при серийном производстве. Чтобы снизить стоимость элементов, следует стремиться находить максимально возможные значения \mathbf{T} при заданном выходе годных изделий. Решение задачи существует, если номинальные значения параметров \mathbf{X}_0 не расположены на границах области приемлемости. Выполнение этого требования обеспечивает запас работоспособности:

$$a = \min(y(\mathbf{X}_0) - y_{\min}, y_{\max} - y(\mathbf{X}_0)), \quad (5)$$

$$a = y_{\max} - y(\mathbf{X}_0), \quad (6)$$

$$a = y(\mathbf{X}_0) - y_{\min} \quad (7)$$

для ограничений вида (1), (2), (3) соответственно. Для максимизации a в (5) выполняют центрирование $y(\mathbf{X}_0)$ между значениями y_{\min} и y_{\max} . Значение запаса работоспособности определяет условия для решения задачи синтеза допусков.

Анализ чувствительности. При выборе методов синтеза допусков необходимо учитывать возможности инструментов EDA. Программа PSpice Advanced Analysis предоставляет пользователям инструмент Sensitivities для расчета полуотносительных чувствительностей выходных параметров, определяемых посредством инструментов измерения [17]. Реализован однокомпонентный метод анализа чувствительности. Выполняется анализ и измерение выходного параметра $y(\mathbf{X}_0)$ и серия m вариантов анализа и измерений $y(\mathbf{X}_i^*)$, где $\mathbf{X}_i^* = \{x_{01}, \dots, x_{0i} + \Delta x_i^*, \dots, x_{0m}\}$, $\Delta x_i^* = x_{0i} \cdot (S_v \cdot t_i^* / 100 \%)$, t_i^* - предварительно назначенное значение допуска, S_v - коэффициент вариации, $i = \overline{1, m}$. Полуотносительные чувствительности определяются при интерполяции для $t_i^* = 1 \%$:

$$S_{x_i}^y(\mathbf{X}_0) \approx [y(\mathbf{X}_i^*) - y(\mathbf{X}_0)] / (S_v \cdot t_i^*). \quad (8)$$

Возможные причины недоверности результатов рассмотрены в [16].

Предположим, что во всех сечениях по координатам \mathbf{X} функция $y(\mathbf{X})$ является монотонной, изменениями значений чувствительностей в пределах допусковой области можно пренебречь, использование их значений в опорной точке \mathbf{X}_0 дает приемлемую ошибку метода. Тогда отклонение $\Delta y = y(\mathbf{X}) - y(\mathbf{X}_0)$ при относительных отклонениях $\delta x_i = (x_i - x_{0i}) / x_{0i} \cdot 100 \%$ параметров m элементов:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^m S_{x_i}^y(\mathbf{X}_0) \cdot \delta x_i. \quad (9)$$

Случайные значения δx_i ограничены производственными допусками $|\delta x_i| \leq t_i$.

Аналитические методы наихудшего случая. Допуски для наихудшего случая можно получить на основе (9). Полагая, что $\Delta y = a$, $|\delta x_i| = t_i$, знаки δx_i совпадают со знаками чувствительностей $S_{x_i}^y(\mathbf{X}_0)$:

$$a = \sum_{i=1}^m |S_{x_i}^y(\mathbf{X}_0)| \cdot t_i. \quad (10)$$

При равных значениях допусков элементов:

$$t_i = a / \sum_{i=1}^m |S_{x_i}^y(\mathbf{X}_0)|. \quad (11)$$

Полагая, что все элементы вносят одинаковый вклад в отклонение a :

$$t_i = a / (m \cdot |S_{x_i}^y(\mathbf{X}_0)|). \quad (12)$$

В инженерной практике часто целесообразно для некоторых элементов допуски назначать, а для остальных элементов определять. Обозначим m_a количество элементов с назначенными допусками t_{A_j} и m_u количество элементов с определяемыми допусками t_{U_i} . Тогда на основе (10):

$$a = \sum_{j=1}^{m_a} |S_{x_{A_j}}^y(\mathbf{X}_0)| \cdot t_{A_j} + \sum_{i=1}^{m_u} |S_{x_{U_i}}^y(\mathbf{X}_0)| \cdot t_{U_i}, \quad (13)$$

$$t_{U_i} = (a - \sum_{j=1}^{m_a} |S_{x_{A_j}}^y(\mathbf{X}_0)| \cdot t_{A_j}) / (m_u \cdot |S_{x_{U_i}}^y(\mathbf{X}_0)|), \quad (14)$$

где $S_{x_{A_j}}^y(\mathbf{X}_0)$ и $S_{x_{U_i}}^y(\mathbf{X}_0)$ – чувствительности к вариациям параметров элементов x_{A_j} и x_{U_i} с назначенными и определяемыми допусками соответственно. Если получены отрицательные или слишком низкие значения t_{U_i} , задача не имеет допустимого решения для назначенных значений t_{A_j} . Полученные допуски необходимо округлить до стандартных значений. В результате округления значения правых частей в (10) и (13) будут отличаться от a .

Численные методы наихудшего случая. Численные методы синтеза основаны на поиске экстремума целевой функции в пространстве допусков \mathbf{T} . Целевую функцию можно сформировать на основе (10):

$$F(\mathbf{T}) = (a - \sum_{i=1}^m |S_{x_i}^y(\mathbf{X}_0)| \cdot t_i)^2 \rightarrow \min. \quad (15)$$

Если для части элементов допуски целесообразно назначить, то назначенные допуски $\mathbf{T}_A = \{t_{A1}, t_{A2}, \dots, t_{Ama}\}$ необходимо исключить из вектора варьируемых параметров, а для поиска определяемых допусков $\mathbf{T}_U = \{t_{U1}, t_{U2}, \dots, t_{Umu}\}$ целевую функцию можно сформировать на основе (13):

$$F(\mathbf{T}_U) = (a - \sum_{j=1}^{ma} |S_{x_{A_j}}^y(\mathbf{X}_0)| \cdot t_{A_j} - \sum_{i=1}^{mu} |S_{x_{U_i}}^y(\mathbf{X}_0)| \cdot t_{U_i})^2 \rightarrow \min. \quad (16)$$

Целевая функция может быть сформирована для максимизации допусков:

$$F(\mathbf{T}) = \sum_{i=1}^m t_i \rightarrow \max \quad (17)$$

или

$$F(\mathbf{T}) = \min(t_i) \rightarrow \max \quad (18)$$

при использовании (10) в качестве функциональных ограничений.

Задачи нелинейного математического программирования (15), (16) и (18) могут быть решены поисковыми методами параметрической оптимизации. Для решения задачи линейного математического программирования (17) может быть использован симплекс-метод. Аналогично (16) из вектора варьируемых параметров \mathbf{T} в (17) и (18) можно исключить назначенные допуски \mathbf{T}_A и выполнять поиск допусков \mathbf{T}_U при функциональных ограничениях (13). Задачи оптимизации с функциями (15)–(18) следует решать при ограничениях $t_i \geq t_{\min i}$ для всех варьируемых параметров, где $t_{\min i}$ – граничное значение допуска.

Аналитические статистические методы. Если при изготовлении дискретных элементов не выполняют подгонку параметров и сортировку по допускам, распределение вероятностей для δx_i можно аппроксимировать нормальным законом с нулевым средним и дисперсией $\sigma_{\delta x_i}^2 = t_i^2/9$. Если прецизионные элементы отбирают сортировкой по допускам, то распределение вероятностей δx_i можно аппроксимировать равномерным законом с дисперсией $\sigma_{\delta x_i}^2 = t_i^2/3$ [18]. Для этих и других случаев можно установить соотношение:

$$\sigma_{\delta x_i} = l_i \cdot t_i, \quad (19)$$

задавая соответствующие значения l_i .

Если количество дискретных элементов m велико, а значения отклонений δx_i статистически независимы, при выполнении условий, сформулированных для (9), распределение вероятностей для Δy хорошо аппроксимируется нормальным законом с нулевым средним и дисперсией [18]:

$$\sigma_{\Delta y}^2 = \sum_{i=1}^m (S_{x_i}^y(\mathbf{X}_0))^2 \cdot \sigma_{\delta x_i}^2. \quad (20)$$

Оценку вероятности выхода годных изделий можно получить с помощью интегральной функции нормированного нормального распределения $F(z)$, где $z = \Delta y / \sigma_{\Delta y}$. Исходя из планируемого относительного выхода продукции Φ^* и свойств нормального распределения, можно задать соотношение:

$$\sigma_{\Delta y} = a / z^*, \quad (21)$$

где $z^* = F^{-1}((\Phi^* + 1)/2)$. В частности, для $\Phi^* = 0.6827$, $z^* = 1$, для $\Phi^* = 0.9545$, $z^* = 2$, для $\Phi^* = 0.9973$, $z^* = 3$.

Специфика определения выходного параметра y может быть причиной, по которой распределение вероятностей Δy будет далеким от нормального закона. В этих случаях можно задать $z^* = \Delta y_{\max} / \sigma_{\Delta y}$, где Δy_{\max} – максимальное отклонение для Φ^* случаев по результатам статистического анализа при использовании прогнозируемых значений допусков.

Предполагая равенство слагаемых в правой части (20) и учитывая (19) и (21), в результате:

$$t_i = a/(z^* \cdot \sqrt{m} \cdot l_i \cdot |S_{xi}^y(\mathbf{X}_0)|). \quad (22)$$

Аналогично (13) баланс дисперсий по группам элементов:

$$\sigma_{\Delta y}^2 = \sum_{i=1}^{m_u} (S_{x_{ui}}^y(\mathbf{X}_0))^2 \cdot \sigma_{\delta x_{ui}}^2 + \sum_{j=1}^{m_a} (S_{x_{aj}}^y(\mathbf{X}_0))^2 \cdot \sigma_{\delta x_{aj}}^2. \quad (23)$$

Назначая допуски t_{Aj} и задавая коэффициенты $l_{Aj} = \sigma_{\delta x_{Aj}}/t_{Aj}$, $l_{Ui} = \sigma_{\delta x_{Ui}}/t_{Ui}$, можно найти допуски для остальных элементов:

$$t_{Ui} \approx \sqrt{(a/z^*)^2 - \sum_{j=1}^{m_a} (S_{x_{aj}}^y(\mathbf{X}_0) \cdot l_{Aj} \cdot t_{Aj})^2} / (\sqrt{m_u} \cdot l_{Ui} \cdot |S_{x_{ui}}^y(\mathbf{X}_0)|). \quad (24)$$

Если получено отрицательное значение в числителе под корнем, задача не имеет решения для заданных значений t_{Aj} .

Численные статистические методы. Используя (20) или (23), можно сформировать целевые функции для поисковой оптимизации допусков:

$$F(\mathbf{T}) = [(a/z^*)^2 - \sum_{i=1}^m (S_{xi}^y(\mathbf{X}_0) \cdot l_i \cdot t_i)^2]^2 \rightarrow \min, \quad (25)$$

или

$$F(\mathbf{T}_U) = [b - \sum_{i=1}^{m_u} (S_{x_{ui}}^y(\mathbf{X}_0) \cdot l_{Ui} \cdot t_{Ui})^2]^2 \rightarrow \min, \quad (26)$$

$$b = (a/z^*)^2 - \sum_{j=1}^{m_a} (S_{x_{aj}}^y(\mathbf{X}_0) \cdot l_{Aj} \cdot t_{Aj})^2.$$

Также могут быть применены целевые функции (17) или (18) и в качестве функциональных ограничений (20) или (23).

Реализация в Excel. Все рассмотренные методы могут быть реализованы в среде табличного процессора Excel. Excel предоставляет удобные средства для выполнения однотипных вычислений по формулам (11), (12), (14), (22), (24) при реализации рассмотренных аналитических методов. Инструменты линейной и нелинейной оптимизации надстройки "Поиск решения" позволяет реализовать численные методы оптимизации допусков, используя целевые функции (15)–(18), (25), (26) и задавая прямые и функциональные ограничения.

Импорт значений чувствительностей из базы данных инструмента Sensitivity программы PSpice Advanced Analysis и экспорт найденных значений допусков в базу данных схемы редактора Capture удобно выполнять, используя буфер обмена. Основную сложность для реализации импорта чувствительностей представляет возможное присутствие масштабирующих суффиксов ($m - 10^{-3}$, $u - 10^{-6}$, $n - 10^{-9}$ и т.д.). Поэтому содержимое ячейки Excel с принятым значением чувствительности обрабатывается как строка символов:

- ◆ правый символ строки проверяется на совпадение с масштабирующими суффиксами, используя вложенную функцию "ЕСЛИ";

- ◆ остальные символы преобразуются в число функцией "ЗНАЧЕН";

- ◆ полученное значение умножается на масштабирующий коэффициент.

Операция округления найденных значений допусков до стандартных значений реализована, используя вложенную функцию "ЕСЛИ".

Пример. Модемы в системах связи по линиям электропередачи (англ. power line communication (PLC)) реализуют на основе специализированных интегральных AFE. Между внешними элементами сопряжения с линией электропередачи и входом приемного тракта AFE изготовители рекомендуют устанавливать частотно-избирательные полосовые фильтры [19]. Требования к амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) фильтра (рис. 1), зависят от используемого частотного диапазона, определяемого стандартами PLC. Для стандарта CENELEC B [20]:

- ◆ граничные частоты полосы пропускания $f_{pl} = 95$ кГц и $f_{ph} = 125$ кГц;
- ◆ граничные частоты полосы подавления $f_{sl} = 70$ кГц и $f_{sh} = 170$ кГц.

Для двусторонне нагруженного LC фильтра максимальное значение коэффициента передачи в полосе пропускания $H_{pmax} = -5.9$ дБ, на границах полосы подавления $H_{smax} = -36$ дБ. Допустимая неравномерность АЧХ в полосе пропускания - не более 2 дБ ($H_{pmin} = -7.9$ дБ).

Синтез фильтра 6-го порядка (рис. 2) выполнен при аппроксимации АЧХ по Чебышеву с неравномерностью в полосе пропускания 0.5 дБ. Тем самым, сформирован односторонний запас работоспособности $a = 1.5$ дБ. Положение максимумов АЧХ определяется только значениями R1 и R2. При номинальных значениях R1 и R2 максимумы расположены на уровне минус 6 дБ. При выборе резисторов с допуском 1 % предельное положение максимумов не превысит минус 5.93 дБ. В качестве контролируемого выходного параметра у выбрана неравномерность АЧХ в полосе пропускания. При анализе АЧХ в диапазоне частот полосы пропускания для измерения использована функция инструмента Evaluate Measurement PSpice: $\max(\text{db}(v(\text{out})/v(\text{in}))) - \min(\text{db}(v(\text{out})/v(\text{in})))$.

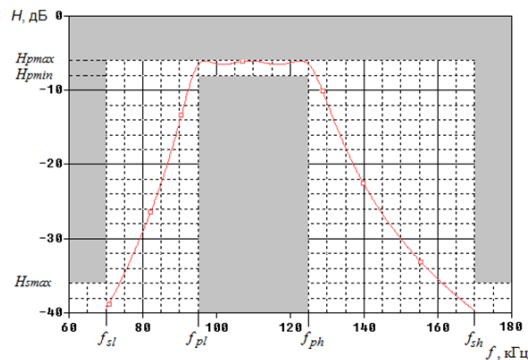


Рис. 1. Технические требования к АЧХ фильтра

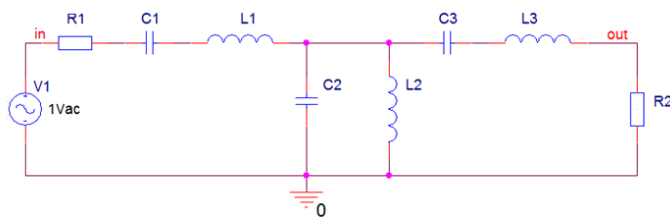


Рис. 2. Полосовой фильтр

Для всех конденсаторов и катушек индуктивности предварительно были заданы допуски 5 %, выполнен анализ чувствительности и статистический анализ методом Монте-Карло. По найденным значениям максимального для $\Phi^* = 1$ и среднеквадратического отклонений у определено значение $z^* = 5.88$. Были заданы допуски для элементов L2, R1, R2. В среде Excel по (24) определены допуски для остальных элементов схемы фильтра, а затем оптимизированы, используя (26). Определены стандартные допуски и стандартные номинальные значения параметров элементов из рядов E24 и E96 (табл. 1).

Таблица 1

Параметры элементов

| Элемент | Чувствительность, дБ/% | Допуск по (25) / по (27) / стандартный, % | Номинальное значение | |
|---------|------------------------|---|----------------------|------------------|
| | | | Рассчитанное | Стандартное |
| C1 | 0.04133 | 6.28 / 5.02 / 5 | 1.635 нФ | 1.6 нФ + 33 пФ |
| C2 | 0.23623 | 0.63 / 1.03 / 1 | 37.78 нФ | 37.4 нФ + 470 пФ |
| C3 | 0.04133 | 6.28 / 5.02 / 5 | 1.635 нФ | 1.6 нФ + 33 пФ |
| L1 | 0.06415 | 4.05 / 3.02 / 5 | 1.304 мГн | 1.3 мГн |
| L2 | 0.16599 | 3 | 56.43 мкГн | 56 мкГн |
| L3 | 0.06415 | 4.05 / 3.02 / 5 | 1.304 мГн | 1.3 мГн |
| R1 | 0.0102 | 1 | 154 Ом | 154 Ом |
| R2 | 0.0102 | 1 | 154 Ом | 154 Ом |

Анализ допусков выполнялся методом Монте-Карло. Значения параметров элементов с допуском 1 % задавались по равномерному закону распределения, параметры остальных элементов по нормальному закону. По результатам 200 испытаний (рис. 3) выход годных изделий составил 68 %. Причиной этого стало искажение АЧХ при найденных стандартных значениях параметров элементов и снижение запаса работоспособности до 0.5 дБ. Попытки оптимизировать АЧХ при варьировании номинальных значений C2 из ряда E96 и остальных параметров из ряда E24, используя метод Discrete engine инструмента Optimizer в программе PSpice Advanced Analysis, не дали приемлемого результата. Для решения проблемы значения C1–C3 были скорректированы набором емкости двух конденсаторов. При повторном анализе Монте-Карло (рис. 4) выход годных изделий составил 98 %.

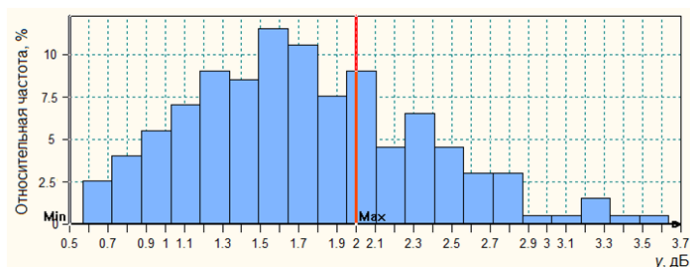


Рис. 3. Результаты допускового анализа

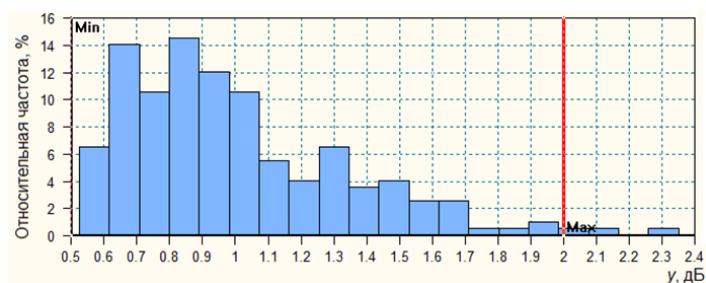


Рис. 4. Результаты повторного допускового анализа

Заключение. Рассмотрены методы синтеза допусков, использующие результаты анализа чувствительности выходного параметра устройства к вариациям параметров пассивных элементов. Предложены модификации аналитических и численных методов синтеза допусков, позволяющие назначать для определенной группы элементов предпочтительные значения допусков. Рассмотрена реализация аналитических и численных методов синтеза допусков на основе табличного процессора Excel.

Преимуществом поисковых методов перед аналитическими методами является возможность нахождения стандартных значений допусков, используя алгоритмы дискретной оптимизации. В надстройке Excel "Поиск решения" доступны только инструменты целочисленной оптимизации, поэтому это преимущество не удалось реализовать. При использовании целевых функций (17) и (18) появляется возможность оптимизации допусков в области работоспособности, сформированной требованиями для нескольких выходных параметров. Для каждого из них требования должны быть представлены в форме функциональных ограничений вида (10), (13), (20) или (23).

Библиотеки активных элементов и функциональных узлов для расширенного анализа PSpice содержат информацию о разбросе параметров их моделей. Инструмент Sensitivity программы PSpice Advanced Analysis предоставляет возможность находить чувствительности выходного параметра к вариациям этих параметров. Это позволяет учитывать в (13) и (23) разброс параметров активных элементов и функциональных узлов, включая их в группу элементов с назначенными допусками.

Предложен способ интеграции программных средств синтеза допусков с инструментами EDA путем импорта значений чувствительностей и экспорта полученных значений допусков через буфер обмена.

Приведен пример допускового проектирования полосового LC фильтра в среде OrCAD PSpice Designer при использовании электронной таблицы Excel. Полученные в результате допускового анализа оценки выхода годных изделий позволяют считать полученные результаты синтеза допусков приемлемыми.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 9664-74 (СТ СЭВ 1809-79) Резисторы. Допускаемые отклонения от номинального значения сопротивления. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 3 с.
2. ГОСТ 28884-90 Ряды предпочтительных значений для резисторов и конденсаторов. – М.: Стандартинформ, 2015. – 12 с.
3. ГОСТ ИЕС 60062-2014. Коды для маркировки резисторов и конденсаторов. – М.: Стандартинформ, 2006. – 12 с.
4. *Гехер К.* Теория чувствительности и допусков электронных цепей: пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1973. – 200 с.
5. *Фомин А.В., Борисов В.Ф., Чермошенский В.В.* Допуски в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Сов. радио, 1973. – 128 с.
6. *Geher K.* Design of electronic circuits for optimal production yield // *Period. Polytech. Elec. Eng.* – 1984. – Vol. 28, No. 1. – P. 67-82.
7. *Spence R., Soin R.S.* Tolerance design of electronic circuits. – 3rd ed. – New York: Addison-Wesley, 1988. – 215 p.
8. *Foo S. W., Lin Y.* Computer-aided design of a mass production circuit // 6th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS '99). – IEEE, 1999. – P. 1495-1498. – DOI:10.1109/ICECS.1999.814453.
9. *Foo S.W., Lin Y.* Hybrid method of tolerance design // 6th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS '99). – IEEE, 1999. – P. 557-560. – DOI: 10.1109/ICECS.1999.812346.

10. *Al-Mohammed M., Esteve D., Boucher J.* Tolerance allocation for an electronic system using neural network/Monte Carlo approach // *Proc. SPIE 4540*. – 2001. – P. 446-457. – DOI: 10.1117/12.450689.
11. *Styblinski M.A.* Statistical design optimization // *Computer aided design and design automation / Wai Kai Chen Ed.* – Boca Raton: CRC Press, 2009. – P. 5-1-5-34.
12. *Соколов Б.В., Шевицова Т.Г.* Методы определения допусков электрических цепей и инварианты чувствительности // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2010. – № 3. – С. 65-69.
13. *Gajda J., Sidor T.* Using Monte Carlo analysis for practical investigation of sensitivity of electronic converters in respect to component tolerances // *Electrical and Electronic Engineering*. – 2012. – No. 2. – P. 297-302. – DOI: 10.5923/j.eee.20120205. 09. 2012.
14. *Pehl M., Graeb H.* Tolerance design of analog circuits using a branch-and-bound based approach // *Journal of Circuits, Systems and Computers*. – 2013. – Vol. 21, No. 8. – P. 1240022-1-1240022-17. – DOI: 10.1142/S0218126612400221.
15. *Shilo G., Furmanova N., Kulyaba-Kharitonova T.* Software for tolerance design of electronic devices // *International Conference Advanced Computer Information Technologies (ACIT 2018)*. – 2018. – P. 14-17.
16. *Khudenev A.* Tolerance design of active RC filters // *2021 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED 2021)*. – IEEE, 2021. – 9444367. – DOI: 10.1109/SED51197.2021.9444367.
17. *Fitzpatrick D.* Analog design and simulation using OrCAD Capture and PSpice. – 2nd ed. – Newnes, 2018. – 438 p.
18. *Влах И., Сингхал К.* Машинные методы анализа и проектирования электронных схем: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с.
19. *Mullins E., Mrabet A.* Analog front-end design for a narrowband power-line communications modem using the AFE031: Application Report SBOA130A. – Texas Instruments, 2011. – 35 p. – URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/sboa130>.
20. *Wang B., Cao Z.* Design of active power filter for narrow-band power line communications // *2018 2nd International Conference on Material Engineering and Advanced Manufacturing Technology (MEAMT 2018)*. – MATEC Web of Conferences, 2018. – Vol. 189. – 04012. – DOI: 10.1051/mateconf/201818904012.

REFERENCES

1. GOST 9664-74 (ST SEV 1809-79) Rezistory. Dopustimye otkloneniya ot nominal'nogo znacheniya soprotivleniya [Resistors. Tolerances on rated resistance]. Moscow: Izd-vo standartov, 1993, 3 p.
2. GOST 28884–90 Ryady predpochtitel'nykh znacheniy dlya rezistorov i kondensatorov [Preferred number series for resistors and capacitors]. Moscow: Standartinform, 2015, 12 p.
3. GOST IEC 60062–2014. Kody dlya markirovki rezistorov i kondensatorov [Marking codes for resistors and capacitors]. Moscow: Standartinform, 2006, 12 p.
4. *Geher K.* Teoriya chuvstvitel'nosti i dopuskov elektronnykh tsepey [Theory of sensitivity and electronic network tolerances]: transl. from engl. Moscow: Sov. radio, 1973, 200 p.
5. *Fomin A.V., Borisov V.F., Chermoshenskiy V.V.* Dopuski v radioelektronnoy apparature [Tolerances in radio-electronic equipment]. Moscow: Sov. radio, 1973, 128 p.
6. *Geher K.* Design of electronic circuits for optimal production yield, *Period. Polytech. Elec. Eng.*, 1984, Vol. 28, No. 1, pp. 67-82.
7. *Spence R., Soin R.S.* Tolerance design of electronic circuits, 3rd ed. New York: Addison-Wesley, 1988, 215 p.
8. *Foo S. W., Lin Y.* Computer-aided design of a mass production circuit, *6th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS '99)*. IEEE, 1999, pp. 1495-1498. DOI:10.1109/ICECS.1999.814453.
9. *Foo S.W., Lin Y.* Hybrid method of tolerance design, *6th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS '99)*. IEEE, 1999, pp. 557-560. DOI:10.1109/ICECS.1999.812346.
10. *Al-Mohammed M., Esteve D., Boucher J.* Tolerance allocation for an electronic system using neural network/Monte Carlo approach, *Proc. SPIE 4540*, 2001, pp. 446-457. DOI: 10.1117/12.450689.

11. *Styblinski M. A.* Statistical design optimization in *Computer aided design and design automation*, Wai Kai Chen Ed. Boca Raton: CRC Press, 2009, pp. 5-1-5-34.
12. *Sokolov B.V., Shevtsova T.G.* Metody opredeleniya dopuskov elektricheskikh tsepey i invariantov chuvstvitel'nosti [Methods for determining the tolerances of electrical circuits and sensitivity invariants], *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass state technical university], 2010, No. 3, pp. 65-69.
13. *Gajda J., Sidor T.* Using Monte Carlo analysis for practical investigation of sensitivity of electronic converters in respect to component tolerances, *Electrical and Electronic Engineering*, 2012, No. 2, pp. 297-302. DOI: 10.5923/j.eee. 20120205.09. 2012.
14. *Pehl M., Graeb H.* Tolerance design of analog circuits using a branch-and-bound based approach, *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2013, Vol. 21, No. 8, pp. 1240022-1-1240022-17. DOI: 10.1142/S0218126612400221.
15. *Shilo G., Furmanova N., Kulyaba-Kharitonova T.* Software for tolerance design of electronic devices, *International Conference Advanced Computer Information Technologies (ACIT 2018)*, 2018, pp. 14-17.
16. *Khludenev A.* Tolerance design of active RC filters, *2021 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED 2021)*. IEEE, 2021, 9444367. DOI:10.1109/SED51197.2021.9444367.
17. *Fitzpatrick D.* Analog design and simulation using OrCAD Capture and PSpice, 2nd ed. Newnes, 2018, 438 p.
18. *Vlach J., Singhal K.* Computer methods for circuit analysis and design. New York: Van Nostrand Reinhold, 1983, 594 p.
19. *Mullins E., Mrabet A.* Analog front-end design for a narrowband power-line communications modem using the AFE031: Application Report SBOA130A. Texas Instruments, 2011, 35 p. Available at: <https://www.ti.com/lit/pdf/sboa130>.
20. *Wang B., Cao Z.* Design of active power filter for narrow-band power line communications, *2018 2nd International Conference on Material Engineering and Advanced Manufacturing Technology (MEAMT 2018)*, MATEC Web of Conferences, 2018, Vol. 189, 04012. DOI: 10.1051/mateconf/201818904012.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Кравченко.

Хлуденев Александр Владимирович – Оренбургский государственный университет; e-mail: avhkludenev@yandex.ru; г. Оренбург, Россия, тел.: +73532372874; кафедра промышленной электроники и информационно-измерительной техники; к.т.н.; доцент.

Khludenev Alexander Vladimirovich – Orenburg State University; e-mail: avhkludenev@yandex.ru; Orenburg, Russia; phone: +73532372874; industrial electronics and information measuring engineering department; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.89

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-74-85

И.С. Бершолов, Ю.А. Кравченко, А.Г. Слепцов

АЛГОРИТМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ ЗАЩИТЫ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В СЕТИ ИНТЕРНЕТ*

Статья посвящена решению научной задачи защиты конфиденциальной информации в сети Интернет на основе алгоритма кластеризации значительных объемов данных. Защита конфиденциальной информации компьютерной сети является актуальной темой для исследований, особенно в связи с растущим использованием информационных технологий и увеличением объема данных ценной информации, хранящейся в Интернете. С ростом информационной ответственности необходимость в эффективных методах информаци-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00316, <https://rscf.ru/project/22-21-00316/> в Южном федеральном университете.