

УДК 621.311.25:621.039

doi: 10.21685/2072-3059-2023-2-7

## Математическое и программное обеспечение информационно-измерительной системы повышения надежности конструкций электронной аппаратуры

Е. Т. Ескибаев<sup>1</sup>, Г. А. Ануар<sup>2</sup>, А. Г. Избасов<sup>3</sup>,  
И. М. Рыбаков<sup>4</sup>, М. Н. Байсеитов<sup>5</sup>, А. В. Григорьев<sup>6</sup>

<sup>1,3,5</sup>Военный институт Сил воздушной обороны

имени дважды Героя Советского Союза Т. Я. Бегельдинова, Актобе, Казахстан

<sup>2</sup>Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан

<sup>4,6</sup>Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup>erbol.eskibaev\_26.04@mail.ru, <sup>2</sup>galym\_rma@mail.ru, <sup>3</sup>iag1973@mail.ru,

<sup>4</sup>rybakov\_im@mail.ru, <sup>5</sup>spellbinderrus@gmail.com, <sup>6</sup>a\_grigorev@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Исследование электронной аппаратуры в области воздействия на нее вибрационной нагрузки не перестает быть актуальным для сложных систем с быстродействующей электронной аппаратурой. Технологии изготовления печатных плат, да и сам печатный монтаж в настоящее время представляют собой хорошо отлаженный производственный механизм, в результате которого получается высококачественный продукт в виде печатных плат. Но, несмотря на высокую степень надежности электронной аппаратуры, а в частности ее составной части – печатной платы, при возникновении определенных условий внешних воздействующих факторов велик шанс выхода ее из строя за счет возникновения в конструкции печатной платы критических деформаций и механических напряжений. В связи с этим возникает проблема учета в конструкции печатной платы критических деформаций при возникновении определенных (жестких) условий внешних воздействующих факторов и выработка путей анализа, предотвращения и усовершенствования конструкции печатной платы. *Материалы и методы.* В работе применены способы и методы математического, имитационного, алгоритмического и программного анализа и расчета критических деформаций с учетом механических напряжений в типовых конструкциях печатной платы для повышения ее механической прочности. *Результаты.* Усовершенствованы модели и методы моделирования конструкций электронной аппаратуры для повышения точности и прогнозирования надежности. *Выводы.* Разработаны уточненная математическая и имитационная модели расчета механических напряжений и перемещений печатной платы, алгоритм применения уточненной математической модели, программа расчета уточняющего коэффициента.

**Ключевые слова:** точность, имитационная модель, надежность, алгоритм, уточняющий коэффициент

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20318, <https://rscf.ru/project/22-29-20318/>.

**Для цитирования:** Ескибаев Е. Т., Ануар Г. А., Избасов А. Г., Рыбаков И. М., Байсеитов М. Н., Григорьев А. В. Математическое и программное обеспечение информационно-измерительной системы повышения надежности конструкций электронной аппаратуры // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 2. С. 90–106. doi: 10.21685/2072-3059-2023-2-7

## Mathematical and software of the information and measuring system for improving the reliability of electronic equipment designs

E.T. Eskibaev<sup>1</sup>, G.A. Anuar<sup>2</sup>, A.G. Izbasov<sup>3</sup>,  
I.M. Rybakov<sup>4</sup>, M.N. Bayseitov<sup>5</sup>, A.V. Grigoriev<sup>6</sup>

<sup>1,3,5</sup>Military Institute of the Air Defense Forces of the Republic of Kazakhstan  
named after T.Ya. Begeldinov, Aktobe, Kazakhstan

<sup>2</sup>Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

<sup>4,6</sup>Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup>erbol.eskibaev\_26.04@mail.ru, <sup>2</sup>galym\_rma@mail.ru, <sup>3</sup>iag1973@mail.ru,

<sup>4</sup>rybakov\_im@mail.ru, <sup>5</sup>spellbinderrus@gmail.com, <sup>6</sup>a\_grigorev@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The study of electronic equipment in the field of the impact of vibration load on it does not cease to be relevant for complex systems with high-speed electronic equipment. Printed circuit board manufacturing technologies, and the printed circuit board itself, currently represents a well-established production mechanism, as a result of which a high-quality product in the form of printed circuit boards is obtained. But despite the high degree of reliability of electronic equipment, and in particular its component part, as a printed circuit board, when certain conditions of external influencing factors occur, there is a high chance of its failure due to the occurrence of critical deformations and mechanical stresses in the design of the printed circuit board. In this regard, there is a problem of taking into account critical deformations in the design of the printed circuit board when certain (harsh) conditions of external influencing factors occur and developing ways to analyze, prevent and improve the design of the printed circuit board. *Materials and methods.* The paper uses methods and methods of mathematical, simulation, algorithmic and software analysis and calculation of critical deformations taking into account mechanical stresses in typical PCB designs to increase its mechanical strength. *Results.* Models and methods of modeling electronic equipment designs have been improved to improve accuracy and reliability prediction. *Conclusions.* The refined mathematical and simulation models of calculation of mechanical stresses and displacements of the printed circuit board, the algorithm of application of the refined mathematical model, the program of calculation of the clarifying coefficient are developed.

**Keywords:** accuracy, simulation model, reliability, algorithm, refinement factor

**Financing:** the research was financed by the RSF grant No. 22-29-20318, <https://rscf.ru/project/22-29-20318/>.

**For citation:** Eskibaev E.T., Anuar G.A., Izbasov A.G., Rybakov I.M., Bayseitov M.N., Grigoriev A.V. Mathematical and software of the information and measuring system for improving the reliability of electronic equipment designs. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(2):90–106. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-2-7

### Введение

Рассмотрим плоский поперечный изгиб пластины, которую можно представить в виде печатной платы, при котором все силы лежат в одной полкости и перпендикулярны продольной оси. В таких случаях в поперечных сечениях действуют поперечная сила и изгибающий момент, при этом продольное усилие равно 0. Возможно действие сосредоточенных и распределенных нагрузок. При плоском поперечном изгибе поперечная сила равняется сумме сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого сечения, и изгибающий момент равен сумме моментов всех сил, расположенных по одну сторону рассматриваемого сечения относительно центра тяжести сечения.

### Математическая модель расчета распределенных нагрузок при поперечном изгибе печатной платы

Математически внутренние усилия при изгибе можно записать следующим образом:

$$Q(x) = \sum F_i + \sum \int q_i(x) dx,$$

$$M_Z(x) = \sum M_i + \sum \int F_i h(x) + \sum \int q_i(x) + \sum \int q_i(x) h(x) dx, \quad (1)$$

где  $h(x)$  – плечо силы.

На практике распределенная нагрузка, расположенная по одну сторону от выделенного сечения, заменяется результирующей сосредоточенной силой, приложенной в центре тяжести распределенной нагрузки. Момент от распределенной нагрузки рассчитывается как произведение результирующей силы на ее плечо. При этом закон изменения момента зависит от того, взято сечение в пределах действия распределенной нагрузки или за ее пределами (рис. 1).

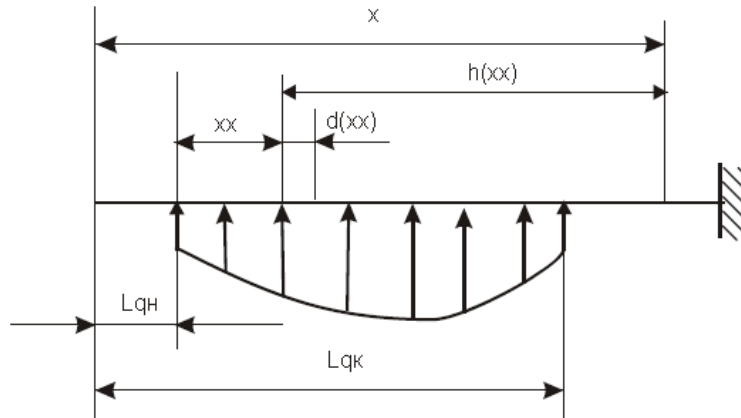


Рис. 1. Упрощенная модель пластины, нагруженной произвольной распределенной нагрузкой

Составим выражение для изгибающего момента, единое для всех участков пластины. На рис. 1 показана упрощенная модель пластины, нагруженной распределенной нагрузкой. На расстоянии  $xx$  от начала нагрузки выделим элемент длиной  $d(xx)$ . На него действует нагрузка  $q(x) \cdot d(xx)$ . На расстоянии  $x$  от начала пластины выделим произвольное сечение и найдем изгибающий момент в этом сечении от нагрузки, действующей на элемент  $d(xx)$ :

$$dM_{zq} = q(xx) \cdot d(xx) \cdot h(x),$$

где  $h(x) = x - xx - L_{qH}$  – плечо силы  $q(x) \cdot d(xx)$ .

При этом полный изгибающий момент от распределенной нагрузки равен

$$M_{zq}(x) = \int_0^{xx} q(xx) \cdot d(xx) \cdot h(x). \quad (2)$$

Если сечение взято в пределах распределенной нагрузки и сечение взято за пределами распределенной нагрузки, то получаем

$$M_{zq}(x) = \int_0^{L_{qk}-L_{qH}} q(xx) \cdot d(xx) \cdot h(x). \quad (3)$$

Если распределенная нагрузка постоянной интенсивности приложена лишь к части пластины, то ее можно заменить двумя нагрузками: распределенной нагрузкой, приложенной от сечения  $x = L_{qH}$  до конца пластины, и фиктивной распределенной нагрузкой той же величины, но противоположного направления, приложенной от сечения  $x = L_{qK}$  до конца пластины [1]:

$$\begin{aligned} Q_q(x) &= \sum q_i(x - L_{qH}) - \sum q_i(x - L_{qK}), \\ M_{zq}(x) &= \sum q_i \frac{(x - L_{qH})^2}{2} - \sum q_i \frac{(x - L_{qK})^2}{2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Математически поперечную силу и изгибающий момент можно записать следующим образом:

$$Q(x) = \sum F_i + \sum \int q_i(x) dx, \quad M_z(x) = \sum M_i + \sum \int F_i h(x) + \sum \int q_i(x) h(x) dx.$$

Для использования данных математических выражений надо записать функцию изменения интенсивности распределенной нагрузки по длине стержня при:

$$q = \text{const} \quad \left| \quad q = \text{переменная} \right.$$

$$q(x) = \begin{cases} q_1, \text{ если } L_{qH_1} \leq x \leq L_{qK_1}, \\ q_2, \text{ если } L_{qH_2} \leq x \leq L_{qK_2}, \\ 0 \frac{\text{кН}}{\text{м}} \text{ иначе,} \end{cases} \quad q(x) = \begin{cases} \left( 4 \cdot q_1 \cdot \frac{x - L_{qH_1}}{L - L_{qH_1}} \right), \text{ если } L_{qH_1} \leq x \leq L_{qK_1}, \\ \left[ q_2 \left( 1 - \frac{x - L_{qH_2}}{L - L_{qH_2}} \right) \right], \text{ если } L_{qH_2} \leq x \leq L_{qK_2}, \\ 0 \frac{\text{кН}}{\text{м}} \text{ иначе.} \end{cases}$$

Поперечная сила:

$$Q(x) = \sum_{i=1}^{\text{rows}(F)} F_i \cdot (x \geq L_{M_i}) + \int_0^x q(x) dx.$$

Изгибающий момент:

$$M_z(x) = \sum_{i=1}^{\text{rows}(M)} \left[ M_i \cdot (x \geq L_{M_i}) \right] +$$

$$+ \sum_{i=1}^{\text{rows}(F)} \left[ F_i \cdot (x - L_{F_i}) \cdot (x \geq L_{F_i}) \right] + \int_0^x q q(x) \cdot (x - x) \cdot dx.$$

Определение внутренних усилий от сосредоточенных сил:

$$Q_F(x) = \sum_{i=1}^{\text{rows}(F)} \left[ F_i \cdot (x \geq L_{F_i}) \right].$$

Определение внутренних усилий от распределенной нагрузки интенсивностью  $q = \text{const}$ :

$$Q_q(x) = \sum_{i=1}^{\text{rows}(q)} \left[ q_i \cdot (x - L_{qH_i}) \cdot (x \geq L_{qH_i}) \right] - \sum_{i=1}^{\text{rows}(q)} \left[ q_i \cdot (x - L_{qK_i}) \cdot (x \geq L_{qK_i}) \right],$$

$$Q(x) = Q_F(x) + Q_q(x).$$

Определение внутренних усилий от пар сил и от сосредоточенных сил:

$$M_{zM}(x) = \sum_{i=1}^{\text{rows}(M)} \left[ M_i \cdot (x \geq L_{M_i}) \right], \quad M_{zF}(x) = \sum_{i=1}^{\text{rows}(F)} \left[ F_i \cdot (x - L_{F_i}) \cdot (x \geq L_{F_i}) \right].$$

Для перехода к определению напряжений и перемещений в опасном сечении будем использовать значения  $Q$  и  $M$ , взятые по модулю. Поскольку размерности у них разные, то для определения максимальной силы используются разные выравнивающие размерности в составном массиве вывода результатов расчета [2]:

$$M_{\max} = F_{\max}(M_Z, L_H, L_K, N), \quad Q_{\max} = F_{1\max}(Q, L_H, L_K, N),$$

$$x_{M_{\max}} = \frac{F_{\max}(M_Z, L_H, L_K, N)}{H}, \quad x_{Q_{\max}} = \frac{F_{1\max}(Q, L_H, L_K, N) \cdot \text{мм}}{H}.$$

Исходя из полученной математической модели получим значение перемещения в опасном сечении при условии длины печатной платы в 30 [мм] и нагрузки в виде изгибающего момента в 1 [Н · м], равное

$$x_{Q_{\max}} = 0,28 \text{ мм}.$$

Общая картина распределения изгибающих моментов и сил представлена на рис. 2.

В результате было получено значение перемещений пластины, имеющей свойства печатной платы как изотропного материала. При этом значение перемещения в 0,28 мм в полученной математической модели является максимальным значением [3]. Исходя из полученных результатов была поставлена задача уточнить математическую модель изгиба прямоугольной пластины с жестким закреплением одной стороны и свободно опертой по трем с учетом различной плотности печатных проводников на ней. Для уточнения полученной математической модели требуется провести имитационное моделирование.

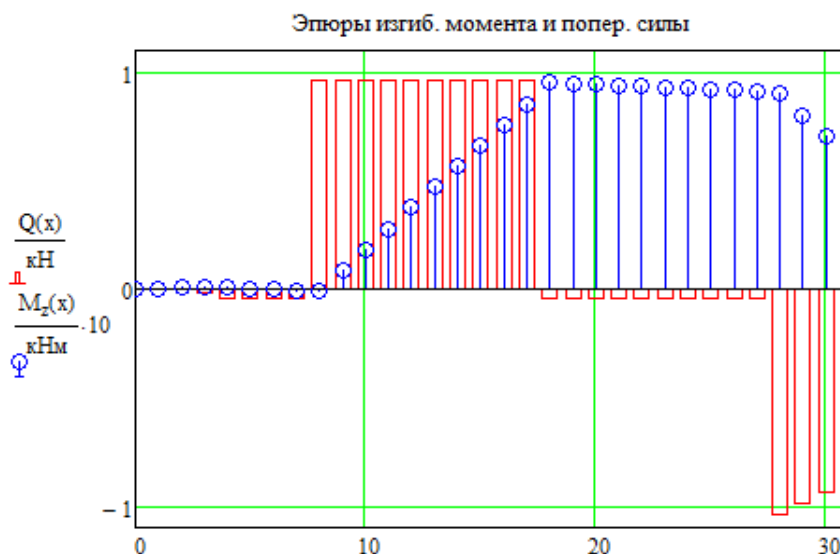


Рис. 2. Эпюра распределения изгибающих моментов и сил для расчетной пластины

### Имитационная модель для расчета механических напряжений и перемещений печатной платы

Для проведения имитационного моделирования печатной платы были созданы четыре твердотельные модели печатных плат: без проводников, с проводниками на одной стороне, с проводниками с двух сторон, с проводниками с двух сторон и полигонами. Каждая из моделей представляет собой твердотельную модель реальной конструкции печатной платы с различной плотностью печатных проводников. Граничные условия для всех четырех плат являются одинаковыми и представлены на рис. 3.

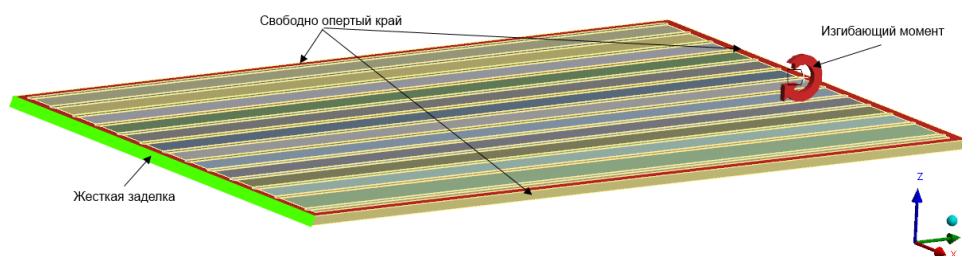


Рис. 3. Модель и схема граничных условий

На рис. 3 видно, что изгибающий момент действует на всю поверхность платы. При этом для каждого случая будет меняться только поверхность воздействия, площадь во всех случаях является одинаковой [4].

После задания граничных условий был проведен расчет согласно заданным нагрузкам, в результате которого были получены эпюры распределения механических напряжений и перемещений на печатной плате. В первом случае для печатной платы без проводников характер распределения механических напряжений является равномерным, а максимальное значение составляет 2,38 МПа. Данные представлены на рис. 4.

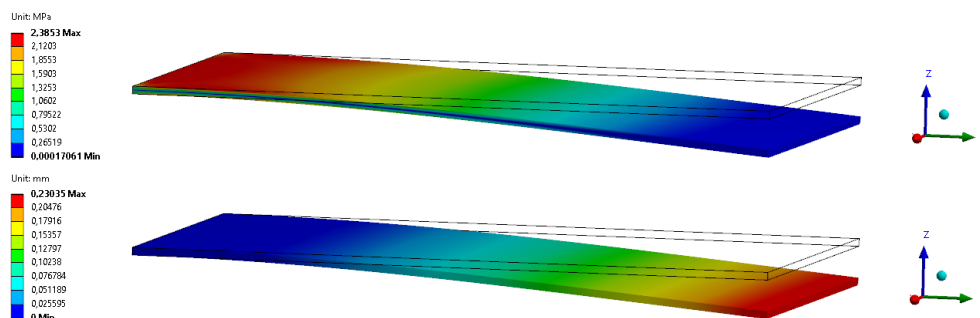


Рис. 4. Эпюры распределения механических напряжений и перемещений на печатной плате без проводников

Такое распределение соответствует полученной математической модели, что подтверждает изотропные свойства материала при математическом расчете и имитационном моделировании. Также согласно нижней части рис. 4, где показаны перемещения печатной платы при нагрузке, максимальные перемещения платы составили 0,23 мм [5]. Анализ полученных результатов численного и имитационного моделирования позволяет сделать вывод об адекватности модели при получении результатов.

На следующем этапе моделирования в расчетную модель были внесены изменения в части добавления печатных проводников на верхнюю сторону исследуемой модели [6, 7]. Эпюры распределения механических напряжений и перемещений на печатной плате с проводниками на одной стороне представлены на рис. 5.

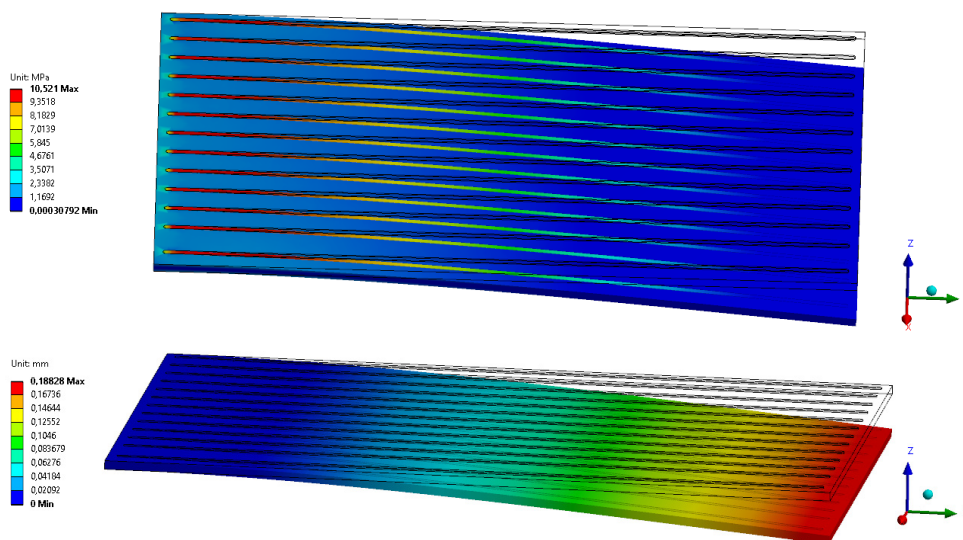


Рис. 5. Эпюры распределения механических напряжений и перемещений на печатной плате с проводниками на одной стороне

Из рис. 5 следует, что при включении в расчетную имитационную модель печатных проводников характер распределения механических напряжений изменился. Концентрация напряжений переместилась в область печат-

ных проводников и составила 10 Мпа, что существенно больше, чем в первом случае [8]. Данное перераспределение объясняется различием в значениях модуля упругости материала основания платы и меди. Также из эпюры перемещений следует, что максимально печатная плата прогнулась на 0,18 мм.

На рис. 6 показаны эпюры распределения механических напряжений и перемещений на печатной плате с проводниками с двух сторон. В верхней части рис. 6 показана нижняя часть печатной платы с проводниками, из которого следует, что при заданных воздействиях на печатную плату максимальные напряжения также распределились по печатным проводникам. При этом характер распределения напряжений в верхней части печатной платы схож с эпюрой, представленной на рис. 5.

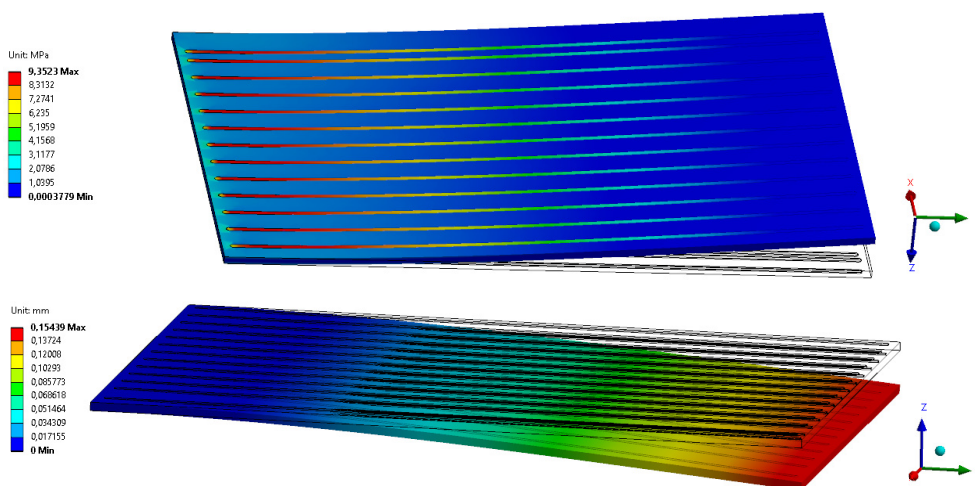


Рис. 6. Эпюры распределения механических напряжений и перемещений на печатной плате с проводниками с двух сторон

Из рис. 6 также следует, что при распределении механических напряжений по медным проводникам вектор направления максимальных усилий смещен в сторону края с жестким закреплением. При этом максимальные перемещения платы равны 0,15 мм.

На рис. 7 показаны эпюры распределения механических напряжений и перемещений на печатной плате с проводниками с двух сторон и полигонами.

Из рис. 7 следует, что при учете в имитационной модели печатных проводников и полигонов характер распределения механических напряжений имеет резко другую структуру, а места возникновения максимумов переместились в граничные узлы между материалом основания и медью. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о резком увеличении жесткости печатной платы и, как следствие, большой погрешности при численном расчете. Также об увеличении жесткости говорят значения перемещений платы, которые для данного случая составили 0,06 мм.

В результате проведения имитационного моделирования были получены значения механических напряжений и перемещений на печатной плате при различной плотности печатного монтажа. Их результаты позволяют сде-



лать вывод о возможном введении в расчетную математическую модель уточняющего коэффициента зависимости перемещений печатной платы от плотности печатного монтажа.

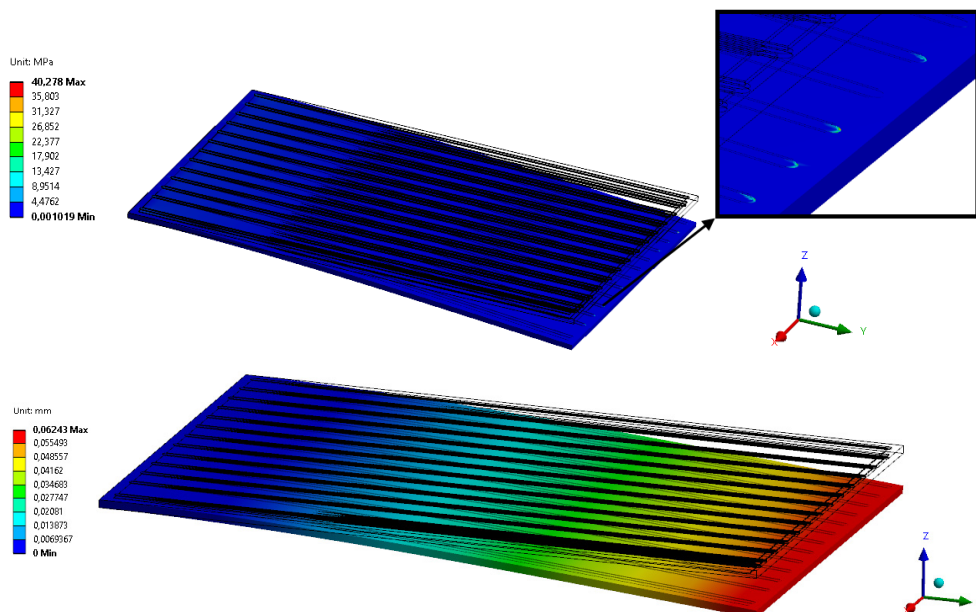


Рис. 7. Эпюры распределения механических напряжений и перемещений на печатной плате с проводниками с двух сторон и полигонами

#### Уточнение математической модели определения изгиба прямоугольной пластины с жестким закреплением одной стороны и свободно опертой по трем

В результате проведения имитационного моделирования была выявлена прямая зависимость изгиба печатной платы от плотности печатных проводников на ней. Но практическую важность представляет учет степени влияния и характер распределения печатного монтажа на печатной плате.

В первом приближении для учета печатных проводников в печатной плате возможно использовать физические свойства материала основания и меди в их определенном сочетании. Таким образом, используя «смесь» свойств материалов, получим уточненные значения изгиба, характерные первому случаю имитационного моделирования. Но в данном случае большую долю погрешности вычислений будет вносить отсутствие возможности учета в модели связей между деталями, так как эта модель представляет собой единую структуру с изотропными свойствами во всех направлениях [9, 10].

Для учета связей между деталями печатной платы в математической модели было предложено внести в нее уточняющие коэффициенты. На рис. 8 представлен график распределения перемещений в зависимости от длины исследуемых печатных плат. Данные характеристические зависимости показывают степень отклонения точек печатной платы по длинной стороне. Распределение изгиба по длине печатной платы для исследуемых образцов имеет резкое увеличение изгиба в начале платы с последующей линелизацией гра-

фика. Такое распределение изгиба объясняется способом закрепления детали жесткой заделкой и применением воздействующих сил.

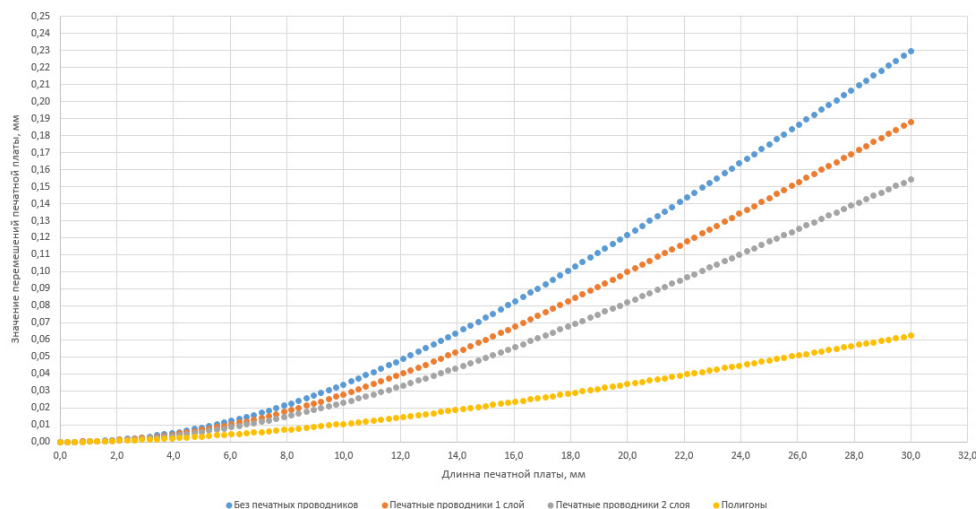


Рис. 8. Графики распределения перемещений в зависимости от длины исследуемых печатных плат

Из графиков также видно, что для всех печатных плат распределение изгиба показано для 30 мм длины, но исследование проводилось для плат длиной до 200 мм. Это допущение сделано для визуализации графиков в диапазоне от 0 до 20 мм. Данные графики были аппроксимированы полиномом второй степени, позволяющим рассчитать уточняющие коэффициенты, что в дальнейшем позволит уточнить математическую модель для расчета распределенных нагрузок при поперечном изгибе печатной платы. Формулы для расчета уточняющих коэффициентов:

– с проводниками на одной стороне:

$$K = 0,0002x^2 + 0,0021x - 0,0057; \quad (5)$$

– с проводниками с двух сторон:

$$K = 0,0001x^2 + 0,0018x - 0,0047; \quad (6)$$

– с проводниками с двух сторон и полигонами:

$$K = 4e^{-5}x^2 + 0,0009x - 0,0017. \quad (7)$$

Как было сказано ранее, математическая модель расчета распределенных нагрузок при поперечном изгибе печатной платы представлена в [1]. Дополнив данную математическую зависимость уточняющим коэффициентом, получим

$$Q(x) = \sum F_i + \sum \int q_i(x) dx + K. \quad (8)$$

Математическая модель (8) позволяет уточнить величину изгиба при подстановке определенного коэффициента, соответствующего печатной плате с соответствующей плотностью монтажа.

На рис. 9 представлены графики зависимости уточняющего коэффициента от длины печатной платы.

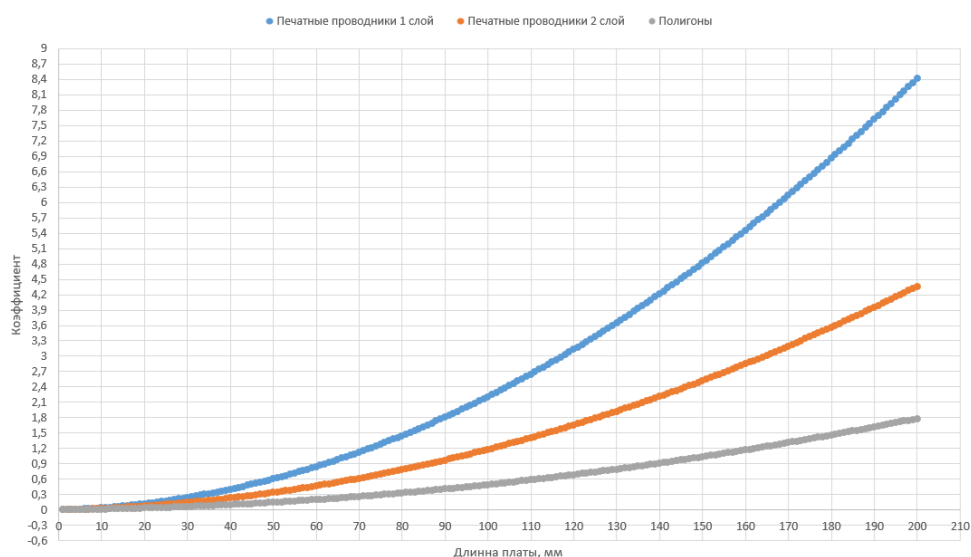


Рис. 9. График зависимости уточняющего коэффициента от длины печатной платы

Из рис. 9 следует, что применение уточняющего коэффициента для расчета величины изгиба позволяет повысить точности математической модели определения механических перемещений печатной платы в зависимости от плотности печатного монтажа.

#### **Алгоритм применения уточненной математической модели для определения изгиба прямоугольной пластины с жестким закреплением одной стороны и свободно опертой по трем**

После уточнения математической модели определения изгиба печатной платы была составлена блок-схема алгоритма применения коэффициента зависимости перемещения от плотности монтажа печатной платы. Данный алгоритм позволяет с высокой точностью определять изгиб печатной платы с различной плотностью монтажа печатных проводников. Характерной особенностью полученного алгоритма является возможность его включения в метрологическую модель повышения точности расчета информационно-измерительных систем анализа вибрационной нагрузки с помощью уточняющих коэффициентов.

Работа алгоритма заключается в следующем: в начале происходит ввод исходных данных или граничных условий, таких как модуль упругости, коэффициент Пуассона, жесткости при сжатии и расширении. Следующим этапом является математический расчет внутренних усилий при изгибе, на котором происходит определение величины прогиба от собственных инерционных составляющих пластины. Далее определяются изгибающие моменты в пластине, после чего происходит определение внутренних усилий от распределенной нагрузки.

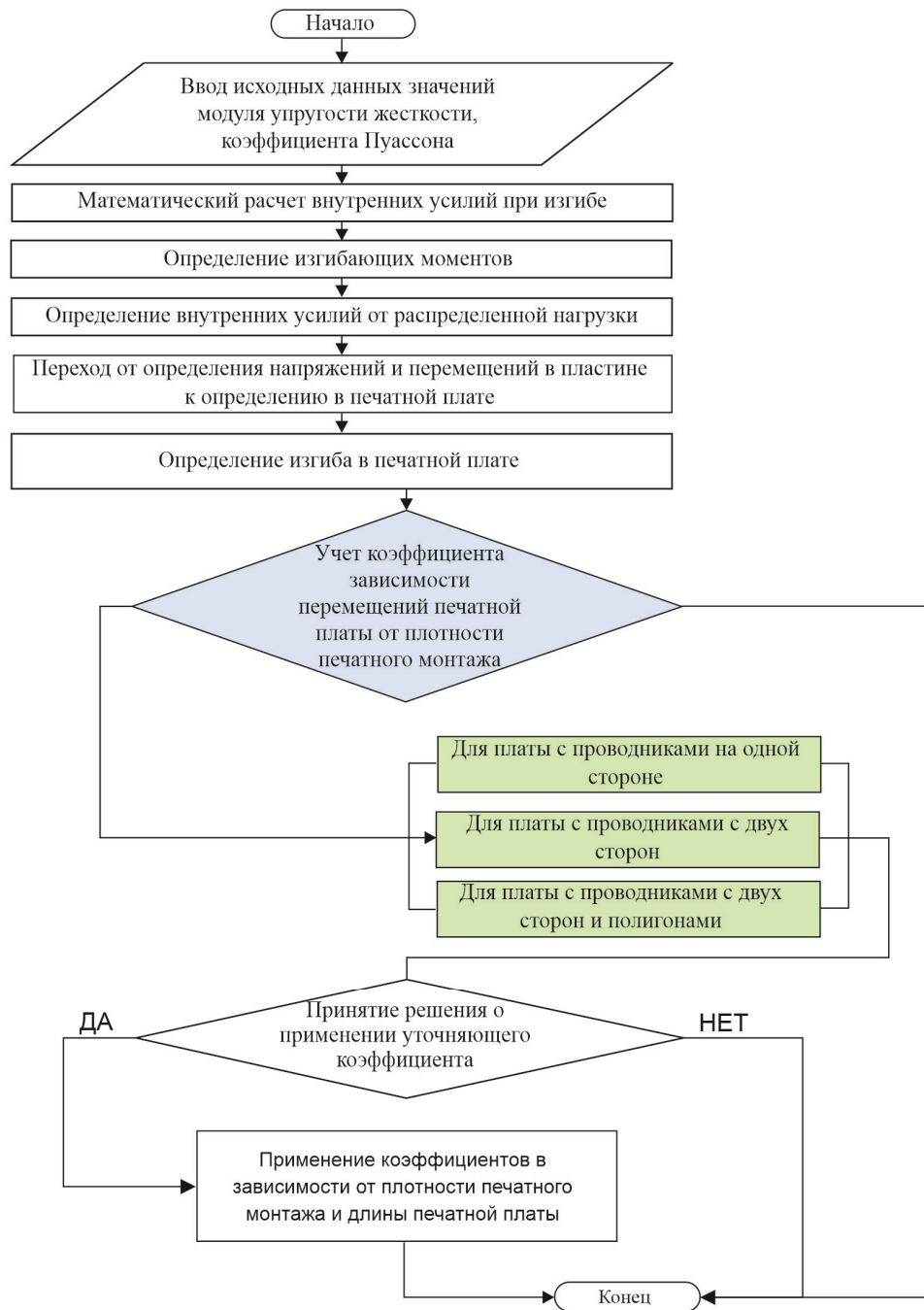


Рис. 10. Блок-схема алгоритма применения коэффициента зависимости перемещения от плотности монтажа печатной платы

После получения значений перемещений в исследуемой печатной плате следующим этапом является ввод уточняющего коэффициента зависимости перемещений печатной платы от плотности печатного монтажа. Для этого следует перейти к следующим этапам алгоритма и применить один из возможных вариантов, когда:

- печатная плата с проводниками на одной стороне;
- печатная плата с проводниками с двух сторон;
- печатная плата с проводниками с двух сторон и полигонами.

Следующим этапом после определения плотности печатного монтажа согласно предложенной классификации является принятие решения о применении уточняющего коэффициента и, в случае его применения, определения его значения с помощью специальной программы расчета. В результате был создан алгоритм применения уточненной математической модели для определения изгиба прямоугольной пластины с жестким закреплением одной стороны и свободно опертой по трем. Применение уточняющего коэффициента позволяет в некоторых случаях повысить требования к надежности за счет повышения сложности конструкции и в то же время снизить риск выхода из строя электронной аппаратуры при критических внешних воздействующих факторах [11].

### Программа расчета уточняющего коэффициента при изгибе прямоугольной пластины с жестким закреплением одной стороны и свободно опертой по трем

Исходя из полученных зависимостей уточняющего коэффициента от длины печатной платы была составлена программа расчета уточняющего коэффициента зависимости перемещений печатной платы от плотности печатного монтажа. На рис. 11 представлена экранная форма программы, в которой существует возможность получить уточняющий коэффициент для печатных плат при их изгибе в зависимости от количества медных слоев в ее структуре [12]. Данная программа позволяет упростить расчет надежности характеристик печатных плат с одновременным увеличением точности расчета.

| Программа расчета уточняющего коэффициента зависимости перемещений печатной платы от плотности печатного монтажа |        |          |        |                            |        |          |        |          |         |          |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|----------|--------|----------------------------|--------|----------|--------|----------|---------|----------|--------|
| Печатные проводники 1 слой                                                                                       |        |          |        | Печатные проводники 2 слой |        |          |        | Полигоны |         |          |        |
|                                                                                                                  |        | Длина ПП | К      |                            |        | Длина ПП | К      |          |         | Длина ПП | К      |
| коэф.1                                                                                                           | 0,0002 | 100      | 2,2043 | коэф.1                     | 0,0001 | 100      | 1,1753 | коэф.1   | 0,00004 | 100      | 0,4883 |
| коэф.2                                                                                                           | 0,0021 |          |        | коэф.2                     | 0,0018 |          |        | коэф.2   | 0,0009  |          |        |
| коэф.3                                                                                                           | 0,0057 |          |        | коэф.3                     | 0,0047 |          |        | коэф.3   | 0,0017  |          |        |

Рис. 11. Программа расчета уточняющего коэффициента

### Заключение

В результате проведенных исследований была уточнена математическая модель расчета распределенных нагрузок при поперечном изгибе печатной платы за счет применения имитационного моделирования для расчета механических напряжений и перемещений печатной платы. Предложен алгоритм применения уточненной математической модели для определения изгиба прямоугольной пластины с жестким закреплением одной стороны и свободно опертой по трем, а также создана программа расчета уточняющего коэффициента при изгибе прямоугольной пластины. Данные исследования электронной аппаратуры позволяют определить вибрационные нагрузки, произвести расчеты основных параметров работоспособности печатных плат еще на стадии разработки, а также теоретически и практически обосновать

необходимость учета в конструкции печатной платы критических деформаций. Алгоритмическая и программная реализация полученных результатов позволяет выработать пути предотвращения отказов и усовершенствования конструкции электронной аппаратуры.

### Список литературы

1. 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, TSCZh 2022. 2022. P. 50–53.
2. 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
3. Куатов Б. Ж., Рыбаков И. М., Юрков Н. К. К проблеме создания цифровых моделей теплонагруженных элементов радиоэлектронной системы // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 9–19. doi: 10.21685/2307-4205-2022-1-2 EDN: RASHMR
4. Иофин А. А., Боков А. С. Конструктивные пути повышения надежности бортовых радиоэлектронных систем // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 1. С. 44–49. EDN: FZVUDA
5. Ильин А. С., Рыбаков И. М., Лысенко А. В., Юрков Н. К. Современное состояние информационно-измерительных систем поверки преобразователей высокого напряжения // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 31–36. doi: 10.21685/2307-5538-2022-4-4 EDN: XNQIKV
6. Фролов С. И., Данилова Е. А., Трусков В. А. [и др.]. К вопросу моделирования собственных частот колебаний многогранных призм безрезонансных конструкций бортовых радиоэлектронных средств // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 80. С. 151–162. doi: 10.21667/1995-4565-2022-80-151-162 EDN: LILTUE
7. Данилова Е. А., Таньков Г. В., Юрков Н. К. К вопросу построения конечно-разностных моделей пластинчатых конструкций РЭС // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2022. Т. 11, № 1 (57). С. 39–42. doi: 10.46548/21vek-2022-1157-0007 EDN: XBOBXQ
8. Власов А. И., Курносенко А. Е., Ларионов И. Т., Соловьев В. А. Экспертная система и база знаний по физическим основам обеспечения надежности изделий электронной техники // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 2. С. 148–154. EDN: NHBGIB
9. Юрков Н. К. Современное состояние исследований в области создания высоконадежной бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 5–12. doi: 10.21685/2307-4205-2021-4-1 EDN: VBJPMK
10. Godnev A. G., Lysenko A. V., Yurkov N. K. [et al.]. A Technique for Designing a Wide-Band Capacitive Level Gauge for Automated Information and Measurement Petrochemical Accounting Systems // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 – Proceedings, Moscow, 11–13 March 2020. Moscow, 2020. P. 9067435. doi: 10.1109/MWENT47943.2020.9067435 EDN: APPAYH
11. Елизарова А. М., Ласинская К. А., Кривулин К. С. [и др.]. Реализация симуляционных и имитационных моделей передачи информации в различных программных средах // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 2. С. 118–120. EDN: HLCHNL
12. Калашников В. С., Лысенко А. В., Таньков Г. В. [и др.]. Формирование управляющего сигнала адаптивной информационно-измерительной и управляющей си-

стемы вибрационных испытаний // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 90–97. doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-10 EDN: RUJKEF

## References

1. 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, TSCZh 2022*. 2022:50–53.
2. Rybakov I.M., Lysenko A.V., Brostilov S.A., Gerasimova Yu.E. The information-measuring and control system for thermophysical modeling of electronic equipment parameters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2022;(2):36–45. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2022-2-3 EDN: BJZNEH
3. Kuatov B.Zh., Rybakov I.M., Yurkov N.K. On the problem of creating digital models of heat-loaded elements of a radio-electronic system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):9–19. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2022-1-2 EDN: RASHMR
4. Iofin A.A., Bokov A.S. Constructive ways to improve the reliability of on-board radio-electronic systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2022;1:44–49. (In Russ.). EDN: FZVUDA
5. Il'in A.S., Rybakov I.M., Lysenko A.V., Yurkov N.K. Current state of information-measuring systems for verification of high-voltage converters. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(4):31–36. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-4-4 EDN: XNQIKV
6. Frolov S.I., Danilova E.A., Trusov V.A. et al. On the issue of modeling the natural frequencies of oscillations of polyhedral non-resonant prisms of the design of on-board radio electronics. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University*. 2022;(80):151–162. (In Russ.). doi: 10.21667/1995-4565-2022-80-151-162 EDN: LILTUE
7. Danilova E.A., Tan'kov G.V., Yurkov N.K. On the issue of constructing finite-difference models of RES plate structures. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus = The 21<sup>st</sup> century: results of the past and problems of the present plus*. 2022;11(1):39–42. (In Russ.). doi: 10.46548/21vek-2022-1157-0007 EDN: XBOBXQ
8. Vlasov A.I., Kurnosenko A.E., Larionov I.T., Solov'ev V.A. Expert system and knowledge base on the physical foundations of ensuring the reliability of electronic products. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2021;2:148–154. (In Russ.). EDN: NHBGIB
9. Yurkov N.K. The current state of research in the field of creating highly reliable on-board electronic equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):5–12. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2021-4-1 EDN: VBJPMK
10. Godnev A.G., Lysenko A.V., Yurkov N.K. et al. A Technique for Designing a Wide-Band Capacitive Level Gauge for Automated Information and Measurement Petrochemical Accounting Systems. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 – Proceedings, Moscow, 11–13 March 2020*. Moscow, 2020:9067435. doi: 10.1109/MWENT47943.2020.9067435 EDN: APPAYH
11. Elizarova A.M., Lasinskayte K.A., Krivulin K.S. et al. Implementation of simulation and simulation models for information transfer in various software environments. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;2:118–120. (In Russ.). EDN: HLCHNL

12. Kalashnikov V.S., Lysenko A.V., Tan'kov G.V. et al. Formation of a control signal for an adaptive information-measuring and control system for vibration tests. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(4):90–97. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-10 EDN: RUJKEF

**Информация об авторах / Information about the authors**

***Ербол Токтамысович Ескибаев***

начальник кафедры тактики авиации,  
Военный институт Сил воздушной  
обороны имени дважды Героя  
Советского Союза Т. Я. Бегельдинова  
(Казахстан, г. Актобе,  
ул. Алии Молдагуловой, 39А)

E-mail: erbol.eskibaev\_26.04@mail.ru

***Erbol T. Eskibaev***

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

***Галымжан Амандыкович Ануар***

старший преподаватель кафедры  
космической техники и технологии,  
Евразийского национального  
университета имени Л. Н. Гумилева  
(Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2)

E-mail: galym\_rma@mail.ru

***Galymzhan A. Anuar***

Senior lecturer of the sub-department  
of space engineering and technology,  
Eurasian National University (2 Satpayeva  
street, Astana, Kazakhstan)

***Аскар Гадылишевич Избасов***

заместитель начальника Военного  
института, Военный институт Сил  
воздушной обороны имени  
дважды Героя Советского Союза  
Т. Я. Бегельдинова (Казахстан,  
г. Актобе, ул. Алии Молдагуловой, 39 А)

E-mail: iag1973@mail.ru

***Askar G. Izbasov***

Deputy head of the Military Institute,  
Military Institute of Air Defense Forces  
named after twice Hero of the Soviet  
Union T.Ya. Begeldinov (39A Aliyi  
Moldagulovoy street, Aktobe, Kazakhstan)

***Илья Михайлович Рыбаков***

кандидат технических наук, доцент  
кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: rybakov\_im@mail.ru

***Ilya M. Rybakov***

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

***Мадни Нуралиевич Байсеитов***

преподаватель кафедры тактики авиации,  
Военный институт Сил воздушной  
обороны имени дважды Героя  
Советского Союза Т. Я. Бегельдинова  
(Казахстан, г. Актобе,  
ул. Алии Молдагуловой, 39А)

E-mail: danikm755@gmail.com

***Madi N. Bayseitov***

Lecturer of the sub-department of aviation  
tactics, Military Institute of Air Defense  
Forces named after twice Hero of the Soviet  
Union T.Y. Begeldinov (39A Aliyi  
Moldagulovoy street, Aktobe, Kazakhstan)



***Алексей Валерьевич Григорьев***

кандидат технических наук, 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 engineering sciences,  
associate professor of the sub-department  
of constructing and producing radio  
equipment, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

**Поступила в редакцию / Received 23.01.2023**

**Поступила после рецензирования и доработки / Revised 29.04.2023**

**Принята к публикации / Accepted 02.06.2023**