

Исследование влияния плотности монтажа компонентов на колебательные характеристики многослойных печатных плат

С.Ш. Рехвиашвили¹, М.О. Мамчурев¹, В.В. Нарожнов¹,
М.М. Ошхунов², А.Х. Тлибеков³

¹Институт прикладной математики и автоматизации
Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук,
г. Нальчик, Россия

²Институт информатики и проблем регионального управления
Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии
наук, г. Нальчик, Россия,

³ООО «Вебер Инжиниринг», г. Москва, Россия

narojnov.victor@gmail.com

Надежность работы электронной аппаратуры существенно снижается при таких механических воздействиях, как вибрации, удары, скоростные перегрузки и акустические шумы. Проблема эффективной виброзащиты электронной аппаратуры тесно связана с задачами конструирования: компоновка печатных плат, обеспечение теплового режима, экранировка и т.п. Поэтому определение взаимосвязи структуры печатных плат с их вибрационными характеристиками представляет практический интерес.

Проведено экспериментальное исследование влияния плотности монтажа электронных SMD-компонентов на колебательные характеристики многослойных печатных плат. Предложена теоретическая модель для качественной интерпретации измерений. Показано, что изменение колебательных характеристик определяется не общей массой легких SMD-компонентов, а изменением структуры поверхностного монтажа и упругих свойств печатных плат, что необходимо учитывать при обеспечении виброзащиты электронной аппаратуры.

Проведенные исследования подтверждают, что поверхностный монтаж SMD-компонентов и соответствующая система металлизации делают конструкцию печатных плат более жесткой. Это приводит к увеличению добротности собственных колебаний. Дополнительному закреплению необходимо подвергать те участки печатных плат, которые содержат большее количество SMD-компонентов, плотно прилегающих своим основанием к поверхности.

Ключевые слова: печатная плата; SMD-компонент; собственная частота колебаний; изгибная жесткость; логарифмический декремент затухания.

Для цитирования: Исследование влияния плотности монтажа компонентов на колебательные характеристики многослойных печатных плат / С.Ш. Рехвиашвили, М.О. Мамчурев, В.В. Нарожнов и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 2. – С. 141–148. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-2-141-148

Influence of Component Mounting Density on Oscillating Characteristics of Multilayer Printed Circuit Boards

*S.Sh. Rekhviashvili¹, M.O. Mamchuev¹, V.V. Narozhnov¹,
M.M. Oshkhunov², A.Kh. Tlibekov³*

¹*Research Institute of Applied Mathematics and Automation of KBSC
RAS, Nalchik, Russia*

²*Institute of Informatics and Problems of Regional Management of KBSC
RAS, Nalchik, Russia*

³*Ltd. «Weber Engineering», Moscow, Russia*

narojnov.victor@gmail.com

The reliability of the electronic apparatuses operation significantly decreases under such mechanical effects as vibrations, impacts, speed overloads and acoustic noises. The problem of the efficient vibration protection of electronic apparatuses is closely related with such constructing problems, as an arrangement of printed boards, the thermal regime provision, screening, etc. Therefore, the determination of correlation of the printed board structures with their vibration characteristics presents practical interest.

The influence of the density installation of lightweight electronic SMD components on the vibration characteristics of multilayer printed circuit boards has been experimentally and theoretically studied. A theoretical model for the qualitative interpretation of measurements has been proposed. It has been shown that the change in the oscillatory characteristics had been determined not by the total mass of the SMD components, but by a change in the structure of the surface mounting and the elastic properties of the printed circuit boards, which must be taken into account when providing the electronic equipment vibration protection.

The performed studies confirm that that the surface mounting of the SMD components and an appropriate metallization system make the construction of the printed circuit boards more rigid and this results in the increase of the good quality of natural vibrations.

Keywords: printed circuit board; SMD component; natural oscillation frequency; flexural stiffness; logarithmic decrement.

For citation: Influence of component mounting density on oscillating characteristics of multilayer printed circuit boards / S.Sh. Rekhviashvili, M.O. Mamchuev, V.V. Narozhnov et al. // Proc. of Universities. Electronics. – 2018. – Vol. 23. – № 2. – P. 141–148. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-2-141-148

Введение. К электронной аппаратуре (ЭА), устанавливаемой на кораблях, самолетах и спутниках, предъявляются повышенные требования по виброзащите [1]. Это связано с тем, что надежность работы ЭА существенно снижается при таких механических воздействиях, как вибрации, удары, скоростные перегрузки и акустические шумы. Источниками этих воздействий могут быть различные двигатели, функциональная тряска, взрывы и т.п. Механические воздействия могут приводить к нарушению целостности электрических контактов и соединений, изменению электрофизических характеристик отдельных пассивных и активных компонентов, паразитным электромагнитным навод-

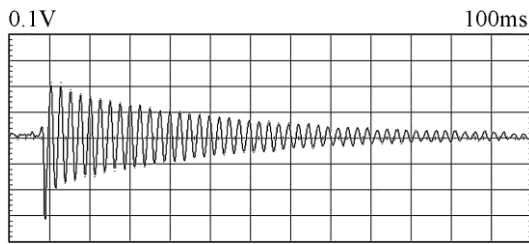
кам и деформированию конструкций. Постоянный рост скоростей подвижных объектов с установленной на них ЭА, а также их эксплуатация в экстремальных условиях увеличивают сложность задачи защиты от механических воздействий. Следует также отметить, что блоки и узлы ЭА представляют собой сложные конструкции, в которых могут возникать резонансные явления, усиливающие механические нагрузки в десятки и сотни раз.

Высокая надежность ЭА при механических воздействиях достигается в результате использования виброустойчивых радиоэлементов и узлов, прочных конструктивных элементов, изоляции и демпфирования ЭА от источников механических воздействий, устранения или уменьшения резонансных явлений, снижения активности источников механических воздействий, применения активной виброзащиты [1–3]. Чтобы обеспечить надежное функционирование ЭА, необходимо на этапе проектирования сопоставить допустимые параметры механических воздействий на отдельные компоненты и узлы с требованиями технического задания. Если это достигнуто, то на следующем этапе требуется проанализировать и устранить возможные резонансные явления в конструкциях. Если же устранить резонансные явления не удастся, то следует применить общую или локальную виброизоляцию [1]. Проблема эффективной виброзащиты ЭА тесно связана с такими задачами конструирования, как компоновка печатных плат (ПП), обеспечение теплового режима, экранировка и т.п. В связи с этим определение взаимосвязи структуры ПП с их вибрационными характеристиками представляет практический интерес [4–9].

Цель настоящей работы – экспериментальное и теоретическое исследование влияния плотности монтажа SMD-компонентов (от англ. Surface Mount Device) на собственную частоту, амплитуду и логарифмический декремент затухания колебаний многослойных ПП. Используются специально разработанный измерительный стенд, а также метод Рэлея для оценки упругих характеристик ПП.

Экспериментальная методика. Исследованы образцы ПП, представляющие собой прямоугольные пластины с одинаковыми размерами и различной плотностью поверхностного монтажа компонентов. Разработан и изготовлен измерительный стенд, принцип работы которого состоит в следующем. Образец ПП жестко закрепляется с одной выбранной стороны. На противоположную сторону образца с помощью двухсторонней липкой ленты приклеивается небольшой магнит. На определенном (фиксированном) расстоянии от магнита размещается катушка с сердечником, которая служит для детектирования колебаний образца. Для обеспечения одинаковых условий все измерения для различных образцов ПП проводятся с одним и тем же магнитом. Колебания ПП возбуждаются механическим способом. Для этого используется электродвигатель с малыми оборотами, на вал которого прикреплен гибкая отклоняющая пластина. В процессе вращения эта пластина цепляет образец за свободный край и тем самым возбуждает его колебания. Таким образом, при колебаниях в начальный момент времени имеется определенный профиль изгиба исследуемого образца. Измерения электрических сигналов осуществлялись с помощью компьютерного генератора-осциллографа PCSGU-250 фирмы Velleman.

Исследованы три образца ПП цифрового устройства с разным количеством SMD-компонентов. Образцы имеют пять чередующихся слоев из меди и стеклотекстолита FR4. Средние значения коэффициентов заполнения слоев равны: Power и Gnd – 0,9 (90 %); Bottom и Top – 0,3 (30 %). Размер образцов следующий: длина 13 см; ширина 2,8 см; толщина 2 мм. Для каждого образца проводилась серия из пяти измерений и определялись



Пример осциллограммы колебаний печатной платы (образец №1)
Example of an oscillogram of the printed circuit board vibrations (the sample 1)

средние значения измеряемых параметров. Следует отметить хорошую повторяемость результатов эксперимента.

На рисунке приведен пример экспериментальных измерений. Как и ожидалось, использованная экспериментальная методика достаточно чувствительна к изменению плотности монтажа SMD-компонентов схемы. Результаты измерений параметров колебаний образцов приведены в таблице.

Результаты измерений

Measurement results

Номер образца	Количество компонентов	Максимальный размах, В	Собственная частота колебаний, Гц	Логарифмический декремент затухания
1	1	0,53	40	0,27
2	11	0,61	44	0,19
3	15	0,63	44	0,18

Отметим, что чувствительность экспериментальной методики достигается также тем, что эффективная масса балки-осциллятора приблизительно в четыре раза меньше фактической массы образца.

Интерпретация эксперимента. Изменение частоты основного тона колебаний может быть обусловлено изменением массы ПП: увеличение плотности монтажа компонентов приводит, как правило, к увеличению общей массы изделия и, соответственно, к уменьшению собственной частоты колебаний. Чтобы определить частоту колебаний, можно рассчитать эффективную массу балки-осциллятора, которая соответствует эквивалентному точечному осциллятору.

Если представить колеблющуюся ПП в виде точечного осциллятора, то собственная частота колебаний будет определяться по формуле

$$f = f_0 \sqrt{\frac{1}{1+x}} \approx f_0 \left(1 - \frac{x}{2}\right), \quad x = \frac{\Delta m}{m}, \quad (1)$$

где f_0 и m – собственная частота и эффективная масса осциллятора соответственно; Δm – масса компонентов ПП.

Эффективная масса зависит от способа закрепления ПП и всегда меньше ее полной массы. Численно эффективная масса равна массе гипотетического точечного осциллятора, пружинная жесткость и собственная частота колебаний которого совпадают с таковыми для реального осциллятора (в рассматриваемом случае это балка с одним жестко закрепленным концом). Приближенное равенство в (1) можно считать приемлемым при $x \leq 0,2$ или $\Delta m \leq 0,2m$. Ошибка в данном случае будет составлять менее 1,5 %.

В формуле (1) необходимо определить эффективную массу осциллятора. Потенциальная энергия изогнутой балки, выраженная через момент сил $M(x)$, равна [10]

$$U = \frac{1}{2E} \int_0^l \frac{M^2(x)}{J(x)} dx = \frac{k_{\perp}^2 \Delta z^2}{2EJ} \int_0^l x^2 dx = \frac{k_{\perp}^2 \Delta z^2 l^3}{6EJ}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости; J – момент инерции поперечного сечения; k_{\perp} – жесткость балки в вертикальном направлении; l и Δz – длина и деформация балки соответственно.

Приравнявая (2) к потенциальной энергии точечного осциллятора $k_{\perp} \Delta z^2 / 2$, получаем

$$k_{\perp} = \frac{3EJ}{l^3} = \frac{wE}{4} \left(\frac{h}{l} \right)^3, \quad (3)$$

где $J = wh^3 / 12$ (для прямоугольного сечения); h и w – высота и ширина балки соответственно.

Для расчета собственной частоты колебаний методом Рэлея необходимо задавать прогиб консоли, вызванный сосредоточенной силой [11]. Функция прогиба может быть представлена в виде

$$\Delta z(x) = \frac{F_{\perp}}{EJ} \left(\frac{lx^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right), \quad (4)$$

где F_{\perp} – сосредоточенная сила.

Потенциальная энергия деформации балки, вычисленная с помощью (4), совпадает с (2): $U = F_{\perp} \Delta z(l) / 2$. Условная кинетическая энергия колебательного движения консоли с учетом функции (4) равна

$$T = \frac{1}{2} \rho S \frac{F_{\perp}^2}{(EJ)^2} \int_0^l \Delta z(x) dx = \frac{11}{840} \rho S \frac{F_{\perp}^2 l^7}{(EJ)^2}, \quad (5)$$

где ρ – плотность материала балки; S – площадь поперечного сечения балки.

С использованием выражений (2) и (5) круговая частота основного тона колебаний балки вычисляется по формуле [11]: $\omega_0 = \sqrt{U/T}$. В итоге приходим к следующему выражению для собственной частоты колебаний [11,12]:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \approx 0,16 \frac{h}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (6)$$

Эффективная масса эквивалентного точечного осциллятора определяется как

$$m = \frac{k_{\perp}}{\omega_0^2} = \frac{k_{\perp} T}{U} \approx 0,24 m_0, \quad (7)$$

где m_0 – фактическая масса балки.

Отметим, что формула (7) не содержит момент инерции поперечного сечения балки. Это означает, что формула справедлива для балки произвольной формы с постоянным поперечным сечением.

Использованный метод Рэлея вычисления собственной частоты колебаний обеспечивает достаточно высокую точность. Разница с точным выражением, полученным из уравнения свободных колебаний упругой балки с одним закрепленным концом [12], обнаруживается только в числовом множителе (6) в третьем знаке после запятой. Эту разницу можно считать несущественной, поскольку погрешность определения других величин, входящих в (6), может составлять более 10 %. Из формулы (6) видно, что соб-

ственная частота балки зависит как от геометрических размеров, так и упругих свойств материала.

Типичная масса одного SMD-компонента составляет единицы микрограмм, поэтому изменение общей массы компонентов в экспериментах не превышает несколько десятков микрограмм. Из формулы (1) при $x \ll 1$ следует, что такое изменение массы не должно приводить к заметному изменению собственной частоты колебаний образцов ПП. Несмотря на это, эксперимент надежно выявляет изменения частоты, амплитуды и логарифмического декремента затухания колебаний (см. таблицу). Это означает, что увеличение плотности монтажа SMD-компонентов влечет за собой изменение упругих и демпфирующих свойств многослойных ПП. Как следует из проведенных экспериментов, поверхностный монтаж SMD-компонентов приводит к увеличению собственной частоты колебаний ПП, которая определяется формулами (1) и (3).

Образцы ПП с большим числом навесных компонентов отличаются более развитой структурой металлизации во внутренних и внешних слоях. При этом дорожки металлизации играют роль своеобразных армирующих элементов и придают дополнительную жесткость ПП, что также может сказываться на их колебательных характеристиках. Теоретическое исследование влияния структуры металлизированных слоев на колебательные свойства многослойных ПП представляется достаточно сложной задачей и требует отдельного рассмотрения.

Заключение. Проведенные исследования влияния плотности монтажа SMD-компонентов на колебательные характеристики ПП с помощью специального стенда показали, что на частоту, амплитуду и логарифмический декремент затухания колебаний оказывает влияние не масса SMD-компонентов, а структура поверхностного монтажа и металлических слоев ПП. Поверхностный монтаж SMD-компонентов и соответствующая система металлизации делает конструкцию ПП более жесткой и приводит к увеличению добротности собственных колебаний. При эксплуатации ПП в условиях интенсивных вибраций в местах креплений SMD-компонентов возникают достаточно большие механические напряжения, которые могут служить причиной их отслоения. В связи с этим тщательной виброзащите или дополнительному закреплению необходимо подвергать те участки ПП, которые содержат большое количество SMD-компонентов, плотно прилегающих своим основанием к поверхности.

Представляет интерес использовать модальный анализ для исследования колебаний ПП [13]. Этому вопросу будет посвящена отдельная статья.

Литература

1. **Талицкий Е.Н.** Защита электронных средств от механических воздействий. Теоретические основы. – Владимир: Владим. гос. ун-т., 2001. – 256 с.
2. **Зеленов Ю.В.** Виброзащита радиоэлектронной аппаратуры полимерными компаундами. – М.: Радио и связь, 1982. – 296 с.
3. **Филиппов А.В.** Особенности конструирования РЭА, работающей в условиях широкополосной вибрации // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2012. – Вып. 11. – Ч. 2. – С. 18–25.
4. **Steinberg D.S.** Vibrations analysis for electronic equipment. – N. Y., 1973. – 456 p.
5. **Панов А.С.** Расчет динамических характеристик печатных плат при податливых и демпфирующих закреплениях // Изв. вузов СССР. Сер. Приборостроение. – 1986. – № 5. – С. 64–68.
6. **Панов А.С.** Демпфирование колебаний печатных плат сосредоточенным сопротивлением // Изв. вузов СССР. Сер. Приборостроение. – 1986. – № 12. – С. 44–46.
7. **Каленкович Н.И., Фастовец Е.П., Шамгин Ю.В.** Механические воздействия и защита радиоэлектронных средств. – Мн.: Высш. шк., 1989. – 244 с.

8. Новоселов С.П., Боцман А.С., Невлюдова В.В. Экспериментальная установка для исследования влияния механических вибраций на выходные параметры радиоэлектронных средств на основе гибких модулей // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т.6. – № 2. – С. 156–162.
9. Клитной В.В. Исследование вибрационных свойств бортовых плат летательных аппаратов // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 31. – С. 77–83.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Физматлит, 2001. – 264 с.
11. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 744 с.
12. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. – М.: Наука, 1967. – 444 с.
13. Киренков В.В., Микитенко В.Г., Досько С.И. Модальная диагностика переходных неустановившихся процессов при оценке результатов испытаний изделий ракетно-космической техники // Космическая техника и технологии. – 2016. – № 3(14). – С. 80–90.

Поступила 17.10.2017 г.; принята к публикации 16.01.2018 г.

Рехвиашвили Серго Шотович – доктор физико-математических наук, заведующий отделом Института прикладной математики и автоматизации Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук (Россия, 360000, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89-А), rsergo@mail.ru

Мамчурев Мухтар Османович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник отдела Института прикладной математики и автоматизации Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук (Россия, 360000, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89-А), mamchuevms@yandex.ru

Нарожнов Виктор Валерьевич – младший научный сотрудник Института прикладной математики и автоматизации Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук (Россия, 360000, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89-А), narojnov.victor@gmail.com

Оихунов Муаед Музафарович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук (Россия, 360000, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89-А), muaed@inbox.ru

Тлибеков Алексей Хабиевич – доктор технических наук, главный инженер проектов ООО «Вебер Инжиниринг» (Россия, 115088, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д. 4, корп. 1А), tlibekov@weber.ru

References

1. Talickij E.N. *Zashchita ehlektronnyh sredstv ot mekhanicheskikh vozdeystvij. Teoreticheskie osnovy* [Protection of electronic devices against mechanical influences. Theoretical basis]. Vladimir, Vladimir. State. University Publ., 2001. 256 p. (in Russian).
2. Zelenov Yu.V. *Vibrozaschita radioelektronnoj apparatury polimernymi kompaundami* [Vibration protection of electronic equipment by polymer compounds]. Moscow, Radio and Communication Publ., 1982. 296 p. (in Russian).
3. Filippov A.V. Osobennosti konstruirovaniya REA, rabotayushchej v usloviyah shirokopolosnoj vibracii [Features of the RED design operating under wideband vibration conditions]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki – Proceedings of the Tula State University. Technical science*, 2012, no. 11, iss. 2. – pp. 18–25. (in Russian).
4. Steinberg D.S. *Vibrations analysis for electronic equipment*. New York, 1973. 456 p.
5. Panov A.S. *Raschet dinamicheskikh harakteristik pechatnyh plat pri podatlivykh i dempfiruyushchih zakreplenyah* [Calculation of dynamic characteristics of printed circuit boards with compliant and damping fastenings]. *Izv. Vuzov SSSR. Ser. Priborostroenie – Proceedings of Higher educational institutions of the USSR. Ser. Instrument making*, 1986, no. 5, pp. 64–68. (in Russian).
6. Panov A.S. *Dempfirovanie kolebanij pechatnyh plat sosredotochennym soprotivleniem* [Damping of oscillations of printed circuit boards by concentrated resistance]. *Izv. Vuzov SSSR. Ser. Priborostroenie – Proceed-*

ings of Higher educational institutions of the USSR. Ser. Instrument making, 1986, no. 12, pp. 44–46. (in Russian).

7. Kalenkovich N.I., Fastovec E.P., Shamgin Yu.V. *Mekhanicheskie vozdeystviya i zashchita radioelektronnyh sredstv* [Mechanical influences and protection of electronic devices]. Minsk, Vysshaya Shkola Publ., 1989. 244 p.

8. Novoselov S.P., Bocman A.S., Nevlyudova V.V. Eksperimental'naya ustanovka dlya issledovaniya vliyaniya mekhanicheskikh vibratsij na vyhodnye parametry radioelektronnyh sredstv na osnove gibkikh module [An experimental setup for research of the influence of mechanical vibrations on the output parameters of electronic systems based on flexible modules]. *Pribory i metody izmerenij – Devices and Methods of Measurement*, 2015, vol. 6, no. 2, pp. 156–162. (in Russian).

9. Klitnoj V.V. Issledovanie vibracionnyh svoystv bortovyh plat letatel'nyh apparatov [Investigation of vibration properties of airborne board of aircrafts]. *Bulletin of NTU «KhPI» – Vestnik NTU «HPI»*, 2008, no. 31, pp. 77–83. (In Russian).

10. Landau L.D., Lifshic E.M. *Teoriya uprugosti* [Theory of Elasticity]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 264 p. (In Russian).

11. Rabotnov Yu.N. *Mekhanika deformiruемого tverdogo tela* [Mechanics of a deformable solid body]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 744 p. (In Russian).

12. Timoshenko S.P. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Vibrations in engineering]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 444 p. (In Russian).

13. Kirenkov V.V., Mikitenko V.G., Dos'ko S.I. Modal'naya diagnostika perekhodnyh neustanovivshihysya processov pri ocenke rezul'tatov ispytaniy izdelij raketno-kosmicheskoy tekhniki [Modal diagnostics of transient processes during evaluation of results of tests on rocket and space hardware]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii – Space technique and technologies*, 2016, no. 3(14), pp. 80–90. (in Russian).

Submitted 17.10.2017; accepted 16.01.2018.

Rekhiashvili Sergo S. – Dr. Sci. (Phys.-Math.), head of Department, Research Institute of Applied Mathematics and Automation of KBSC RAS (Russia, 360000, Nalchik, Shortanova str., 89-A), rsergo@mail.ru

Mamchuev Mukhtar O. – Cand. Sci. (Phys.-Math.), researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Automation of KBSC RAS (Russia, 360000, Nalchik, Shortanova str., 89-A), mamchuevmc@yandex.ru

Narozhnov Viktor V. – junior researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Automation of KBSC RAS (Russia, 360000, Nalchik, Shortanova str., 89-A), narozhnov.victor@gmail.com

Oshkhunov Muaed M. – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Institute of Informatics and Problems of Regional Management of KBSC RAS (Russia, 360000, Nalchik, Shortanova str., 89-A), muaed@inbox.ru

Tlibekov Alexey K. – Dr. Sci. (Tech.), chief project engineer, Ltd. «Weber Engineering», (Russia, 115088, Moscow, Sharikopodshipnikovskaya str., 4), tlibekov@weber.ru